

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Чередніченко Олександр Костянтинович

УДК 621.4:629.5

**ДИСЕРТАЦІЯ
ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК
З ТЕРМОХІМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ
ДЛЯ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ СУДЕН
І МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВИДОБУВАННЯ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант: Сербін Сергій Іванович, д-р техн. наук, професор

Миколаїв 2020

АНОТАЦІЯ

Чередніченко О. К. Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами для високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки (Технічні науки). –

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерство освіти і науки України, Миколаїв, 2020.

Науково-прикладною проблемою, яка вирішується в дисертації, є підвищення ефективності використання паливних ресурсів та зменшення викидів токсичних компонентів шляхом раціональної організації перетворень енергії в термохімічних системах утилізації теплоти вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

Необхідність виконання вимог законодавчих актів Міжнародної морської організації (ІМО) щодо зниження впливу суднової енергетики на навколишнє середовище визначає **запит практики**, спрямований на розробку та адаптацію енергоефективних технологій в суднову енергетику шляхом комплексного впровадження новітніх установок, визначення діапазонів їх досяжних параметрів з розробкою науково обґрунтованих перспективних схемних рішень, які забезпечують підвищення ефективності використання паливних ресурсів, мінімізацію викидів CO₂ та інших шкідливих речовин в навколишнє середовище.

Відповідно до запиту практики сформульована **мета дослідження** – підвищення ефективності суднових енергетичних установок з термохімічними системами утилізації теплоти вторинних енергоресурсів для високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

Робочою науковою гіпотезою дисертаційного дослідження є твердження, що підвищення ефективності використання енергії палива в енергетичних установках та зменшення викидів шкідливих речовин досягається паровою

конверсією вуглеводневих та спиртових палив за рахунок утилізації теплоти вторинних енергоресурсів з подальшим низькоемісійним спалюванням отриманих продуктів в газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних установках, а також утилізацією енергії скидної теплоти судових малообертових дизельних двигунів термохімічним перетворенням енергії в металогідридних установках.

Для поліпшення ефективності процесів перетворень енергії при термохімічній обробці палив за рахунок підводу теплоти відпрацьованих газів пропонується використовувати **ідею** організації термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив шляхом парової конверсії при параметрах, які узгоджено з параметрами робочих процесів енергетичних установок і вторинних енергоресурсів, а також низькоемісійним спалюванням продуктів термохімічних реакцій в газотурбінних камерах згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива і окиснювача.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії в енергетичних установках при термохімічній утилізації вторинних енергоресурсів.

Предметом дослідження є закономірності процесів термохімічних перетворень енергії, їх вплив на ефективність енергетичних установок для високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

Задачі наукового дослідження:

1. Аналіз тенденцій світового енергоспоживання та оцінка перспективності застосування термохімічних систем утилізації теплоти вторинних енергоресурсів в судовій енергетиці на базі узагальнення та систематизації масиву значень, які описують енергетичні установки високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

2. Виявлення шляхом математичного і фізичного моделювання діапазону ефективного застосування перспективних палив при їх термохімічній обробці шляхом утилізації вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

3. Виявлення закономірностей взаємного впливу характеристик термохімічної обробки вуглеводневих і спиртових палив та параметрів робочих процесів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

4. Розробка науково обґрунтованих нових схемних рішень газотурбінних і комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних установок з термохімічними системами утилізації теплоти вторинних енергоресурсів та дослідження впливу їх параметрів на енергоефективність.

5. Визначення умов ефективного спалювання продуктів термохімічної обробки палив в газотурбінних камерах згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива з повітрям.

6. Теоретичні дослідження процесів спалювання продуктів термохімічної обробки палива в газотурбінній камері згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива та окиснювача.

7. Визначення параметрів ефективного перетворення енергії в металогідридних утилізаційних установках сучасних та перспективних суден-газовозів.

8. Апробація положень концепції підвищення ефективності енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування та впровадження результатів наукових досліджень.

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами й темами, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, мету та головні завдання, наведено методи дослідження, дано обґрунтування достовірності отриманих результатів і висновків, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відображено повноту викладення результатів у публікаціях та ступінь апробації на конференціях.

У **першому розділі** розглянуто тенденції світового енергоспоживання, виявлено значний вплив світового флоту та морських об'єктів

нафтогазовидобування на підвищення якості життя людства, проаналізовано законодавчі акти Міжнародної морської організації щодо енергоефективності суден; відзначено перспективність термохімічних утилізаційних технологій в судновій енергетиці, обґрунтована мета і здійснена постановка завдань дослідження.

У **другому розділі** представлена методологія та обґрунтовані методи дослідження. Виявлена перспективність використання об'єктно-орієнтованих підходів при розв'язуванні задач теоретичних та експериментальних досліджень процесів в суднових енергетичних установках з термохімічною утилізацією. Запропоновано використовувати наступні ієрархічні рівні: модуль в цілому, підсистеми модуля, групи блоків обладнання підсистем, структурно-функціональні блоки, що моделюють одиничні ланки процесу, з поєднанням блоків зв'язками у вигляді матеріальних та енергетичних потоків. Представлена методологія експериментального дослідження, надано опис експериментального стенда для моделювання процесів термохімічної обробки палива при підвищеному тиску з визначенням впливу витрат механічної енергії на ефективність термохімічної утилізації та вимірюванням компонентного складу синтез-газу, який отримано в результаті термохімічної обробки етанолу при підвищеному тиску.

У **третьому розділі** наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень ефективності процесів термохімічної обробки палива. З метою порівняння потенціалів вторинних енергоресурсів суднових теплових двигунів енергетичних установок різного складу розроблена багатовимірна класифікація схем енергетичних установок високотехнологічних суден і об'єктів нафтогазовидобування. Визначено критерії оцінки енергоефективності процесів термохімічної обробки палив та встановлено найбільш перспективні палива для термохімічної обробки шляхом утилізації вторинних енергоресурсів теплових двигунів. Визначено межі застосування існуючих підходів до оцінки ефективності процесів термохімічної обробки палив. Виявлені обмеження, які пов'язані з впливом основних параметрів

процесу конверсії на доцільність застосування термохімічної обробки палив в залежності від їх властивостей. Наведено результати експериментального дослідження комплексного впливу температури, тиску та складу суміші на ефективність термохімічної обробки етанолу з визначенням витрат теплової та механічної потужностей при організації процесів обробки палива. Виявлено значний вплив витрат механічної енергії на ефективність термохімічної обробки палива.

У **четвертому розділі** розроблена математична модель енергетичного модуля з термохімічною утилізацією вторинних енергоресурсів теплових двигунів. Обґрунтовано підходи до створення та надані алгоритми налаштування математичних моделей енергетичних модулів та структурно-функціональних блоків з метою оптимізації процесів термохімічних перетворень енергії.

У **п'ятому розділі** наведені результати теоретичних досліджень параметрів суднових енергетичних модулів з використанням термохімічних технологій утилізації. Доведена ефективність використання на високотехнологічних судах та морських об'єктах нафтогазовидобування газотурбінних та комбінованих енергетичних модулів з термохімічною обробкою базового палива та утилізацією теплоти відпрацьованих газів ГТД. Встановлено, що утилізація вторинних енергоресурсів шляхом термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив забезпечує зменшення питомої витрати палива у порівнянні з традиційними схемами та підвищення ККД до 4 %. Підтверджено підвищення ефективності використання енергії палива на 5-6 % в пропульсивних комплексах сучасних та перспективних суден-газовозів шляхом використання термохімічного перетворення енергії в металогідридних утилізаційних установках. Доведено, що застосування запропонованих термохімічних технологій більш ніж в 1,5 рази зменшує викиди діоксиду вуглецю при експлуатації суднової енергетичної установки високотехнологічного судна або морського об'єкту нафтогазовидобування.

У **шостому розділі** розроблено математичну модель низькоемісійної газотурбінної камери згоряння, що працює на продуктах термохімічної

конверсії, та наведені результати дослідження характеристик робочого процесу при роботі на продуктах термохімічної конверсії попутного газу. Доведена можливість ефективного використання продуктів термохімічної конверсії попутного газу в якості основного палива. Встановлена стабільність процесу горіння в камері згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива і окиснювача. Підтверджено, що викиди основних токсичних компонентів (NO_x і CO) відповідають сучасним європейським стандартам на викиди газотурбінних двигунів.

У цьому розділі наведено результати реалізації комплексу запропонованих технічних рішень при проектуванні енергетичних установок високотехнологічних суден та морських об'єктів нафтогазовидобування, визначено перспективи подальшого застосування отриманих наукових і практичних положень.

За результатами виконаних наукових досліджень розроблено концепцію підвищення ефективності суднових енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування шляхом термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив за рахунок підводу теплоти відпрацьованих газів газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних установок, а також використанням потенціалу вторинних енергоресурсів малообертових дизельних двигунів термохімічним перетворенням енергії в утилізаційних металогідридних установках.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Вперше визначено діапазон ефективного застосування низки вуглеводневих та спиртових палив для термохімічної обробки шляхом утилізації вторинних енергоресурсів енергетичних установок, при цьому виявлено: а) потенціал вторинних енергоресурсів установок на базі газотурбінних двигунів забезпечує ефективну обробку метанолу та етанолу з максимальним приростом теплоти згоряння палива 18–22 %, а також помірну ефективність обробки природного газу, попутного газу та їх головних складових при максимальному прирості 8–12 %; б) потенціал вторинних енергоресурсів установок на базі

чотирьохтактних дизельних двигунів забезпечує ефективну обробку метанолу та етанолу з приростом теплоти згоряння до 20–22 і 15–16 % відповідно; в) температурний потенціал скидної теплоти установок на базі двохтактних дизельних двигунів достатній для ефективних перетворень енергії в металогідридних утилізаційних установках.

2. Вперше доведено, що на відміну від існуючих суднових енергетичних установок без термохімічної обробки палива, термохімічна обробка вищевказаних спиртових та вуглеводневих палив за рахунок утилізації вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден приводить до покращення співвідношення величин викидів CO₂ на одиницю транспортної роботи судна та, відповідно, до зменшення індексу EEDI на: 25–40 % для газовозів LNG з єдиною електроенергетичною установкою; на 30–42 % для газовозів LPG порівняно з енергокомплексами, які працюють на нафтових паливах, та на 22–24 % порівняно з енергокомплексами, які працюють на LPG; на 15–25 % для круїзних суден відносно енергокомплексів, які працюють на нафтових паливах, та на 10–15 % відносно енергокомплексів, які працюють на LNG; на 5–15 % для суден Ro-рах в залежності від особливостей судна, схемних рішень та характеристик енергетичної установки, компонентного складу палива, характеристик термохімічної обробки та робочих процесів теплових двигунів.

3. Вперше обґрунтовано ефективність термохімічної обробки палива при параметрах процесів, які відповідають параметрам робочих процесів енергетичних установок, при цьому встановлено, що утилізація вторинних енергоресурсів газотурбінних суднових енергетичних установок шляхом термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив забезпечує збільшення ККД установки до 4 % відносно контактних газо-паротурбінних установок при умові, що при термохімічній обробці допустиме масове співвідношення витрат пара/паливо складає 6–7 для вуглеводневих палив та 0,6–0,9 для спиртових палив.

4. Вперше доведено, що поліпшення паливної економічності комбінованої дизель-газотурбінної енергетичної установки до 4 % забезпечується термохімічною обробкою палива шляхом утилізації теплоти відпрацьованих газів газотурбінного двигуна за умови проведення термохімічної обробки окремо для ГТД при високому тиску (відповідно до тиску підведення палива до ГТД 1,0–2,5 МПа) та окремо для ДВЗ при низькому тиску (0,6–0,7 МПа) з подальшим сумісним використанням продуктів обробки в якості палива в газотурбінному та дизельному(их) двигуні(ах).

5. Вперше визначено, що на відміну від існуючих підходів до організації ефективного спалювання синтез-газу в камерах згоряння ГТД, використання термохімічної утилізації теплоти відхідних газів дає змогу отримувати продукти термохімічної обробки стійкого складу незалежно від вмісту метану у базовому паливі та забезпечує стабільність процесу горіння в низькоемісійній газотурбінній камері згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива з повітрям.

6. Отримав подальший розвиток метод тривимірного моделювання процесів горіння вуглеводневих та спиртових палив, на базі якого створена континуальна модель робочих процесів в низькоемісійних камерах згоряння ГТД, працюючих на продуктах термохімічної конверсії, яка дозволяє виявити особливості аеродинамічної структури реагуючих потоків в умовах турбулентної взаємодії, а також здійснити вибір раціональних геометричних параметрів для забезпечення сучасних екологічних показників енергетичних установок високотехнологічних суден та об'єктів нафтогазовидобування.

7. Вдосконалено підхід до створення багатofакторних параметричних моделей суднових енергетичних установок, які враховують обмеження допустимих значень параметрів та дозволяють оцінити вплив схемних рішень і параметрів процесів на показники ефективності енергетичних комплексів з утилізацією енергії скидної теплоти шляхом термохімічної обробки палива та термохімічним перетворенням енергії в металогідридних установках.

8. На основі об'єктно-орієнтованого підходу вдосконалено багаторівневу класифікацію структурних схем енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування, яка відрізняється комплексним описом їх складу та головних характеристик, що надало можливість оцінювати доцільність використання традиційних та інноваційних технологій.

На основі отриманих наукових результатів сформульовано **наукові положення:**

1. Підвищення ефективності термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування досягається узгодженням параметрів робочих процесів термохімічної обробки палива та теплових двигунів і забезпечує зростання ККД установок до 4 %.

2. Термохімічна обробка вуглеводневих та спиртових палив з низькоемісійним спалюванням отриманих газоподібних продуктів та утилізацією вторинних енергоресурсів газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних установок, а також використання енергії вторинної теплоти малообертових дизельних двигунів в утилізаційних металогідридних установках забезпечує зменшення викидів діоксиду вуглецю на одиницю транспортної роботи високотехнологічних суден.

3. Комплексне використання термохімічної обробки палива та організація низькоемісійного процесу горіння в газотурбінній камері згорання з попереднім частковим перемішуванням палива з повітрям забезпечують відповідність викидів основних токсичних компонентів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування сучасним європейським стандартам.

Наукове значення роботи полягає в розширенні уявлень про фізико-хімічні процеси термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів, обробки палив та процесів горіння продуктів їх конверсії, що є науковим підґрунтям для реалізації концепції підвищення ефективності суднових енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

Практичне значення отриманих результатів

Обґрунтування діапазону ефективного застосування перспективних вуглеводневих та спиртових палив та отримані регресійні залежності, які описують закономірності впливу параметрів робочих процесів теплових двигунів на компонентний склад та енергетичні характеристики продуктів термохімічної обробки, дозволило розробити алгоритми та методики розрахунку, створити прикладне програмне забезпечення, яке апробоване при виконанні проєктних проробок енергетичного обладнання. Схемні рішення та практичні рекомендації з використання систем термохімічної утилізації в складі газотурбінних та комбінованих установок надали можливість розробити концептуальні проєкти газовозів LNG, LPG, круїзних лайнерів, а також суден Ro-рах, що задовольняють перспективним вимогам ІМО з енергоефективності.

Результати впровадження роботи

Результати дисертаційного дослідження впроваджено при розробці проєкту енергетичного комплексу потужністю 10-15 МВт з термохімічною обробкою попутного нафтового газу для морської платформи (ДП «Дослідно-проєктний центр кораблебудування» державного концерну «Укроборонпром», м. Миколаїв); при розробці концептуальних проєктів газовозів LNG, LPG, круїзних лайнерів, суден Ro-рах з низькоемісійними енергетичними установками («Zaliv Ship Design», «Сі-Джоб Миколаїв» та ДП «ПКБ Чорноморсуднопроєкт», м. Миколаїв); в технічній документації з модернізації енергетичного обладнання та питань адаптування термохімічних технологій утилізації до існуючого енергетичного обладнання (Херсонська верф «Smart Meritime Group», м. Херсон; ТОВ «Енерготехнологія», Миколаївська обл.); при проведенні досліджень характеристик суднових гібридних енергетичних установок з використанням технології SOFC-GT («Jiangsu University of Science and Technology», КНР); при проведенні досліджень характеристик газотурбінних енергетичних установок морського виконання («Georgian Veritas» LTD, Грузія), а також в навчальному процесі при підготовці здобувачів вищої освіти ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт» в Національному

університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), ступенів «Бакалавр» та «Магістр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського (м. Кременчук), ступенів «Бакалавр» та «Магістр» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика» в Вінницькому національному технічному університеті (м. Вінниця), ступенів «Бакалавр» та «Магістр» за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт» в Національному університеті «Одеська Морська Академія» (м. Одеса) та Одеському національному морському університеті (м. Одеса). Впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджується відповідними актами про використання результатів дослідження.

Ключові слова: суднова енергетична установка; конверсія палива; термохімічна утилізація теплоти; газотурбінний двигун; синтез-газ.

SUMMARY

Cherednichenko O. C. Efficiency of Power Plants with Thermochemical Systems for Technology-Intensive Ships and Offshore Oil and Gas Production Facilities. – Manuscript. Dissertation for the Doctoral Degree of Technical Sciences, Specialty 05.05.03 – Engines and Power Plants (Technical sciences). – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ministry of Education and Science of Ukraine, Mykolaiv, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific issue of efficiency increasing of fuel resources use and reduction of toxic components emissions by rational organization of energy transformations in thermochemical systems of waste heat recovery of secondary energy sources in power plants of technology-intensive ships and offshore oil and gas production facilities.

The need to comply with the requirements of the International Maritime Organization's (IMO) legislation to improve energy efficiency determines the demand for practices aimed at adapting energy-efficiency technologies in ship power engineering by means of implementation of advanced heat engines and plants. It also estimates the achievable range of such engines and plants parameters with the development of scientifically sound promising design solutions supplying the increasing of fuel recourses efficiency use, minimizing emissions of CO₂ and other harmful substances in the environment.

The aim of the research is to increase the efficiency of power plants with thermochemical systems of waste heat recovery of secondary energy sources in power plants for technology-intensive ships and offshore oil and gas production facilities.

The **introduction** of the dissertation presents substantiation of the topic relevance, the relation of the research with scientific programs and projects. The research object and subject are formulated along with the research aim, main objectives and methods. Reliability of the obtained results and conclusions is substantiated along with the scientific novelty and practical importance of the dissertation. The completeness of

obtained results presentation is demonstrated in the list of publications and by the level of research approbation at conferences.

In Chapter 1, the global energy consumption trends and rational use of traditional and alternative energy sources have been considered. It has been revealed the significant influence of the world fleet and oil and gas production floating objects on improvement of quality of human life. The legislative acts of the International Maritime Organization concerning ship energy efficiency have been analyzed; the prospects of thermochemical heat recovery technologies in ship power engineering have been noted; the research purpose has been substantiated and the statement of the main tasks has been carried out.

In Chapter 2, the methodology and substantiated research methods have been shown. In solving problems of theoretical and experimental studies of processes in ship power plants with thermochemical heat recovery, the prospects of use of the object-oriented approaches have been identified. It is proposed to use a modular approach according to four hierarchical levels: the module as a whole, module subsystems, groups of equipment blocks of subsystems, structural and functional units simulating individual process units with a combination of units in the form of material, energy and heat flows.

In Chapter 3, the results of theoretical and experimental researches of efficiency of thermochemical fuel treatment processes have been presented. In order to evaluate the potential of waste energy resources of marine heat engines using the thermochemical heat recovery technologies of promising fuels, a multidimensional classification of the schemes of marine power plants of high-tech facilities has been developed. The criteria for assessing the energy efficiency of thermochemical treatment processes of hydrocarbon fuels have been determined, and the most promising fuels for thermochemical treatment by means of waste energy resources recovery of heat engines have been identified. The application limits of the existing approaches to estimation of processes efficiency of thermochemical fuel treatment have been defined. The limitations have been identified, that are related to the influence of the main parameters of the conversion process on the feasibility of thermochemical treatment of fuels depending on their properties. The results of experimental research of aggregate impact of temperature, pressure and mix composition on efficiency of thermochemical

processing of ethanol-based fuels with evaluation of thermal and mechanical power consumption at the processes organization of fuel treatment are resulted. A significant influence of mechanical energy consumption on the energy heat recovery factor, which was not taken into account in previous studies, has been revealed.

In Chapter 4, the conceptual mathematical model of the power module with thermochemical heat recovery of waste energy resources of heat engines has been given. For the purpose of processes optimization of thermochemical energy conversion, approaches to algorithms development to adjust of mathematical models of structural and functional blocks are substantiated.

In Chapter 5, the results of theoretical researches of parameters of ship power modules using thermochemical technologies of heat recovery have been demonstrated. For gas turbine and combined energy modules with thermochemical treatment of the base fuel and heat recovery of exhaust gases of gas turbine engines on high-tech vessels and floating objects of oil and gas production, the efficiency of their use has been proved. It has been established that heat recovery of waste energy resources by thermochemical treatment of hydrocarbon and alcohol fuels reduces the specific fuel consumption compared to traditional schemes. Rising of fuel energy efficiency by 4% in propulsive complexes of modern and promising gas carriers by means of thermochemical energy conversion in metal hydride heat recovery plants has been confirmed. It has been proved that the application of the proposed thermochemical technologies reduces carbon dioxide emissions by more than 1.5 times during operation of a ship power plant of a high-tech vessel or a floating oil and gas production facility.

In Chapter 6, the mathematical model of the low-emission gas turbine combustion chamber operating on thermochemical conversion products has been developed, and the research results of operating process characteristics at work on thermochemical conversion products of an associated gas have been shown. The possibility of efficient use of thermochemical conversion products of an associated gas as the main fuel has been proved. The stability of the combustion process in the combustion chamber with preliminary partial mixing of fuel and oxidant has been revealed. It has been confirmed

that emissions of major toxic components (NO_x and CO) meet the modern European standards for gas turbine engine emissions.

In **Chapter 7**, the results of realization of a complex of the offered technical decisions at power installations design of high-tech vessels and floating objects of oil and gas production have been resulted, prospects of further application of the received scientific and practical positions have been defined.

As a result of the performed scientific researches, the concept of increase of efficiency of ship power plants of technology-intensive ships and offshore oil and gas production facilities is developed. This concept satisfies IMO's perspective requirements on energy efficiency that is expected to come into force since 2025. It is realized by thermochemical treatment of hydrocarbon and alcohol fuels by heat supplying of exhaust gases of gas turbine and combined diesel-gas turbine power plants, as well as by using the potential of secondary energy resources of low-speed diesel engines by means of thermochemical energy conversion in recovery metal-hydride plants. Efficiency improving of thermochemical recovery of secondary energy resources of power plants for technology-intensive ships and offshore oil and gas production facilities is achieved by agreeing on the parameters of operating processes of thermochemical fuel treatment along with heat engines and increases the efficiency of power plants up to 3 %. Thermochemical treatment of hydrocarbon and alcohol fuels with low-emission combustion of gaseous products and utilization of secondary energy resources of gas turbine and combined diesel-gas turbine power plants along with the use of waste heat energy of low-speed diesel engines in recovery metal hydride plants provides reduction of carbon dioxide emissions per unit of transport work of technology-intensive ships. The integrated use of thermochemical fuel treatment and the organization of low-emission combustion in a gas turbine combustion chamber with preliminary partial mixing of fuel with air ensure compliance of major toxic components emissions of power plants of technology-intensive ships and offshore oil and gas production facilities with the modern European standards.

The scientific and practical significance of the dissertation is to expand ideas about the physicochemical processes of thermochemical recuperation of secondary energy

resources, fuel treatment and combustion processes of their conversion products, which is the scientific basis for implementing the concept of technology-intensive ships and offshore oil and gas production facilities corresponding to the global rate according to level of economy and environmental friendliness. Substantiation of effective use range of a number of hydrocarbon and alcohol fuels and the obtained regression dependences, describing the patterns of influence of heat engine operating process parameters on the component composition and energy characteristics of thermochemical products, has allowed to increase the design efficiency of ship power plants operating on various fuels. Design solutions and practical recommendations for the application of thermochemical recovery systems in advanced gas turbine and combined plants have provided an opportunity to develop conceptual designs for LNG and LPG carriers, cruise ships and Ro-pax, which meet the promising IMO's energy efficiency requirements.

The results of the dissertation are used in the practice of forming technical tasks, technical proposals in implementing of design studies of power equipment and in the educational process in the training of bachelor and master students.

Keywords: ship power plant; fuel conversion; thermochemical heat recovery; gas turbine engine; syngas.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових спеціалізованих виданнях, рекомендованих переліком

ДАК МОН України та у іноземних фахових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science Core

Collection

1. **Горбов В. М.** Анализ и перспективы использования отечественных газотурбинных двигателей в судовой энергетике [Текст] / В.М. Горбов, А.К.Чередниченко // Авиационно-космическая техника и технология [Фахове видання України]. – 2008. – № 8(54). – С. 103-107. **Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus.** Автором запропоновані критерії оцінки характеристик ГТД морського виконання та виявлена конкурентоспроможність вітчизняних ГТД.

2. **Ткач М. Р.** Эффективность газотурбинной установки с термодинамической и термохимической регенерацией тепла отходящих газов [Текст] / М.Р. Ткач, А.К. Чередниченко // *Авиационно-космическая техника и технология* [Фахове видання України]. – 2009. – № 7 (64). – С. 19–22. **Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus.** Автором розроблені схемні рішення ГТД з термохімічною обробкою палива шляхом утилізації вторинних енергоресурсів. Сформульований та запропонований в якості критерію ефективності коефіцієнт збільшення теплоти згоряння палива.

3. **Чередниченко А. К.** Об эффективности термохимической регенерации тепла в газотурбинных установках мобильных энергокомплексов [Электронный ресурс] / А.К. Чередниченко // *Вісник НУК* [Електронне фахове видання України]. – 2010. – Вип. 1. – Режим доступа : <http://evn.nuos.edu.ua>. **Видання входить до МНБ – WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

4. **Чередниченко А. К.** Повышение эффективности мобильных газотурбинных установок сложных циклов применением промежуточного теплоносителя [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач, Н.В. Ващиленко // *Авиационно-космическая техника и технология* [Фахове видання України]. – 2010. – № 7(74). – С. 41-44. **Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus.** Автором створена математична модель регенеративного ГТД з проміжним теплоносієм та виявлений взаємозв'язок параметрів циклу ГТД, на базі якого визначені раціональні параметри теплообміннику.

5. **Чередниченко А. К.** К выбору параметров промежуточного теплоносителя регенеративного газотурбинного цикла [Текст] / Чередниченко А.К., Ткач М.Р. *Вестник двигателестроения* [Фахове видання України]. – 2011– № 2. – С. 101-105. **Реферативна база даних "Україніка наукова".** Автором доведено, що з метою мінімізації габаритів теплообмінників необхідно вибирати відносний температурний напір з діапазону 0,35...0,5 та доведено, що варіювання відносного температурного напору в цьому діапазоні дозволяє змінювати співвідношення площ теплообмінників в діапазоні 1,0...3,0 при практично постійній сумарній площі.

6. **Чередниченко А. К.** Энергетические и массогабаритные показатели газотурбинных установок с промежуточным жидкометаллическим теплоносителем [Текст] / А.К. Чередниченко // Збірник наукових праць НУК [Фахове видання України]. – 2011.-№5. –С. 76-83. **Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).**

7. **Чередниченко А. К.** Экспериментальный стенд для исследования термохимической конверсии биоэтанола вторичными энергоресурсами ГТД [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Авиационно-космическая техника и технология [Фахове видання України]. – 2012. – № 7(94). – С. 65-69. **Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus.** Автор розробив та реалізував підхід, згідно з яким представлено експериментальну енергетичну установку з термохімічною обробкою палива у вигляді системи взаємозалежних експериментальних стендів, на кожному з яких досліджуються процеси відповідної підсистеми, та запропонував спосіб вимірювання теплоти спалювання суміші газів парової конверсії спиртів.

8. **Чередниченко А. К.** Оценка эффективности термохимической регенерации тепла в дизель-газотурбинной энергетической установке [Текст] / А.К. Чередниченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії [Фахове видання України]. – 2014. – №2(11) –С. 89-96. **Видання входить до МНБ – Researchbib, Google Scholar, Crossref.**

9. **Чередниченко А. К.** Повышение эффективности комбинированной энергетической установки термохимической регенерацией тепла [Текст] /А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Авиационно-космическая техника и технология [Фахове видання України]. – 2015. – № 7(124) – С. 94-99. **Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus.** Автор розробив підхід до підвищення ефективності використання енергії палива застосуванням комбінованої дизель-газотурбінної установки з термохімічною регенерацією теплоти відпрацьованих газів шляхом парової конверсії вуглеводневого палива та довів, що коефіцієнт корисної дії установки при прийнятих обмеженнях збільшується на 4-5%.

10. **Череди́ченко А. К.** Моделирование энергокомплексов с термохимической регенерацией тепла для судов газозовов [Текст] / Вестник двигателестроения [Фахове видання України]. – 2016.– № 2. – С. 36-41. *Реферативна база даних "Україніка наукова".*

11. **Череди́ченко А. К.** Эффективность термохимической регенерации тепла в энергетической установке судна класса «река-море» [Текст] / А.К. Череди́ченко, М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевский, А.Ю. Проскурин // Авиационно-космическая техника и технология [Фахове видання України] – 2016.– № 8(135). – С. 29-35. *Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus. Автором розроблена математична модель енергетичної установки з термохімічною регенерацією та виявлений взаємний вплив параметрів робочих процесів двигуна та процесів термохімічної обробки палива на ефективність установки.*

12. **Череди́ченко А. К.** Методологическое обеспечение экспериментальных исследований элементов энергетических установок с термохимической регенерацией сбросного тепла [Текст] / А.К. Череди́ченко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії [Фахове видання України]. – 2016 – №1(14) – С. 274-280. *Видання входить до МНБ – Researchbib, Google Scholar, Crossref.*

13. **Череди́ченко А. К.** Влияние климатических факторов на эффективность утилизационной металлгидридной установки двухтопливного малооборотного ДВС газозова [Текст] / А.К. Череди́ченко, М.Р. Ткач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» [Фахове видання України]. – 2017. – № 10(1232) – С.85-91. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus. Автором розроблена математична модель утилізаційної металогідридної установки та встановлені обмеження, які впливають на ефективність перетворення енергії в металогідридних установках.*

14. **Череди́ченко А. К.** Повышение эффективности энергетических установок судов-газозовов применением термохимических технологий [Текст]/ А.К. Череди́ченко // Двигатели внутреннего сгорания [Фахове видання України]. – 2017.– № 1. – С.46-51. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus.*

15. **Cherednichenko O.** Analysis of Efficiency of the Ship Propulsion System with Thermochemical Recuperation of Waste Heat [Text] / Oleksandr Cherednichenko, Serhiy Serbin // Journal of Marine Science and Application. – 2018. P 1-9. **Видання входить до МНБ Scopus, Web of Science Core Collection.** Автором розроблені розрахункові схеми та створені математичні моделі суднових дизель-газотурбінних енергетичних установок з термохімічної обробкою палива, отримані регресійні залежності для розрахунку коефіцієнта збільшення теплоти згоряння в межах заданих діапазонів.

16. **Cherednichenko O.** Efficiency Analysis of Methanol Usage for Marine Turbine Power Plant Operation Based on Waste Heat Chemical Regeneration [Text] / O. Cherednichenko // Problemele Energeticii Regionale – 2019. – Iss. 1. – P 102-111. **Видання входить до МНБ Web of Science Core Collection.**

17. **Чередніченко А. К.** Особенности применения продуктов конверсии метанола в судовой газотурбинной установке с термохимической регенерацией сбросного тепла [Текст]/ А.К. Чередніченко // Авиационно-космическая техника и технология, 2019.– № 3. – С. 28-34. **Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus.**

18. **Чередніченко А. К.** Применение термохимической утилизации в энергетических установках высокотехнологичных судов [Текст] / А.К. Чередніченко // Авиационно-космическая техника и технология, 2019.– № 7. – С. 58-64. **Видання входить до МНБ – Science Index, Google Scholar, Index Copernicus.**

19. **Cherednichenko O.** Improving the Efficiency of a Gas-Fueled Ship Power Plant by Using a Waste Heat Recovery Metal-Hydride System [Text] / Oleksandr Cherednichenko, Mykhaylo Tkach, Boris Timoshevskiy, Valerii Havrysh, Serhiy Dotsenko // Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin.– 2019. – 59 (131). – P. 9–15. **Видання входить до МНБ – Web of Science Core Collection.** Автором розроблена розрахункова схема суднової енергетичної установки, математична модель утилізаційної металогібридної установки.

20. **Cherednichenko O.,** Application of thermo-chemical technologies for converging of associated gas in diesel-gas turbine installations for oil and gas floating

units [Text] / Oleksandr Cherednichenko, Serhiy Serbin, Marek Dzida // POLISH MARITIME RESEARCH. –2019. – 3 (103), Vol. 26. – P. 181-187. **Видання входить до МНБ Scopus, Web of Science Core Collection.** Автором розроблені розрахункові схеми та математичні моделі установок. Виявлений вплив обмежень, які пов'язані з необхідністю узгодження параметрів робочих процесів термохімічної обробки палива та теплових двигунів енергетичних установок.

21. **Cherednichenko O.** The Usage of a Waste Heat Recovery Metal-Hydride Unit of Continuous Operation in the Maritime Energy [Text] / O. Cherednichenko, , M. Tkach, S. Dotsenko. // 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). – 2019. – P . 510-513. **Видання входить до МНБ – Web of Science Core Collection.** Автором встановлені умови забезпечення поліпшення індексу енергоефективності для газовозів LNG з малообертовими дизельними двигунами на 4-6 % при застосуванні утилізаційних металогібридних установок.

22. **Cherednichenko O.** Investigation of the combustion processes in the gas turbine module of an FPSO operating on associated gas conversion products [Text] / Oleksandr Cherednichenko, Serhiy Serbin, Marek Dzida // POLISH MARITIME RESEARCH. – 2019. – 4 (104). – Vol. 26. – P. 149-156. **Видання входить до МНБ Scopus, Web of Science Core Collection.** Автором проведені тривимірні розрахунки робочого процесу в низькоемісійній газотурбінній камері згоряння, виявлені умови ефективного використання продуктів термохімічної конверсії в якості палива та стабільності процесу горіння в камері згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива и окиснювача.

23. **Cherednichenko O.** Local Green Power Supply Plants Based on Alcohol Regenerative Gas Turbines: Economic and Environmental Aspects / O. Cherednichenko, V. Havrysh, V. Shebanin, A. Kalinichenko, G. Mentel, J. Nakonieczny // *Energies* – 2020. – 13 – 2156. **Видання входить до МНБ Scopus, Web of Science Core Collection.** Автор розробив методичне забезпечення для екологічно-економічної оцінки доцільності використання термохімічних технологій в енергетичних установках плаваючих об'єктів нафтогазовидобування та інших високотехнологічних об'єктах.

24. **Cherednichenko O.** Analysis of the Impact of Thermochemical Recuperation of Waste Heat on the Energy Efficiency of Gas Carriers / O. Cherednichenko, V. Mitienkova // *J. Marine. Sci. Appl.* – 2020. – 19. – P. 72-82. **Видання входить до МНБ Scopus, Web of Science Core Collection.** Автором доведено, що забезпечується поліпшення індексу енергоефективності для газовозів LNG з єдиною електроенергетичною установкою на 25–40 % при застосуванні газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних установок з термохімічними системами утилізації вторинних енергоресурсів.

Монографії

1. **Чередніченко О. К.** Термохімічні технології для енергетичних модулів плавучих об'єктів нафтогазовидобутку та суден-газовозів : монографія / О. К. Чередніченко, С. І. Сербін. – Миколаїв : Видавець Торубара В.В. – 2020. – 132 с. Автором проведено дослідження процесів термохімічної обробки палива та визначені основні фізико-хімічні закономірності термохімічного енергоперетворення шляхом утилізації вторинних енергоресурсів судових теплових двигунів.

Патенти на винахід за темою дисертаційного дослідження

1. **Патент України на винахід № 93458, МПК F02C 6/20, 7/10.** Газотурбінна установка [Текст] / Ткач М.Р., Тимошевський Б.Г., Чередніченко О.К.; Заявник та власник патенту Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № а200912664; заявл. 07.12.09; опубл. 10.02.11, Бюл. № 3. Автором запропоноване схемне рішення газотурбінного двигуна з теплообмінником-регенератором у вигляді комплексу з двох теплообмінників, тепловий зв'язок між якими та з ємністю акумуляції тепла здійснюється контуром рідинного теплоносія.

2. **Патент України на винахід № 114698.** Спосіб вимірювання теплоти згоряння суміші газів парової конверсії спиртів та пристрій для його здійснення [Текст] / Чередніченко О.К., Ткач М.Р., Тимошевський Б.Г.; Заявник та власник патенту Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – заявл. 25.09.2013, бюл. № 18, опубл. 25.07.2017, бюл. № 14. Автором

запропоновано спосіб вимірювання теплоти згоряння основних горючих компонентів газів за рахунок вимірювання об'ємної витрати, тиску, температури та перепаду тиску з подальшим визначенням теплоти згоряння суміші газів парової конверсії спиртів згідно з емпіричною нелінійною залежністю.

3. Патент України на винахід № 114166. Газотурбінна установка [Текст] / Чередніченко О.К., Ткач М.Р., Тимошевський Б.Г.; Заявник та власник патенту Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № а200912664; заявл. 25.05.2012, бюл. № 10, опубл. 10.05.2017, бюл. № 9. *Автором запропоноване удосконалення газотурбінної установки шляхом включення в контур рідинного теплоносія термохімічного реактору, що забезпечує використання тепла газів, які відходять з газотурбінного двигуна, для здійснення термохімічної конверсії палива, за рахунок чого досягається підвищення коефіцієнта корисної дії установки.*

Додаткові публікації

1. Горбов В. М. Основные тенденции применения газотурбинных установок на коммерческих судах [Текст] / В.М. Горбов, А.К. Чередниченко // Газотурбинные технологии. 2007. – №9 (60). – С.24-29. *Автор провів дослідження структурних схем суднових енергетичних установок.*

2. Чередниченко А. К. Повышение тепловой экономичности ГТУ за счет регулирования температуры воздуха на входе ГТД [Текст] / Д.В. Дымо, А.К.Чередниченко // Збірник наукових праць НУК [Фахове видання України]. – 2007. – №6. – С.120-128. ***Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Science Index, CrossRef, WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE).*** *Автор дослідив вплив рециркуляції частини відпрацьованих газів ГТД морської бурової платформи на ККД двигуна та утилізаційного контуру.*

3. Горбов В.М. Обеспечение надежности и живучести СЭУ на газотурбозлектроходах [Текст] / В.М. Горбов, А.К.Чередниченко // Вісник СевНТУ [Фахове видання України]. – 2008. – Вип. 87. – С. 51-55. *Автор*

проаналізував вимоги до енергетичних установок газотурбоелектроходів та запропонував перспективні схеми СЕУ.

4. **Горбов В. М.** Анализ структурных схем энергетических установок круизных лайнеров [Текст] / В. М. Горбов, А. К. Чередниченко // Вісник СевНТУ [Фахове видання України]. – 2009. – Вып. 97. – С. 38-42. *Автором запропонована пріоритетність критеріїв вибору типу та складу СЕУ, наведена оцінка існуючих та перспективних проектів високотехнологічних суден.*

5. **Чередниченко А. К.** Критерии выбора состава установки мобильного энергокомплекса [Текст] / А.К. Чередниченко // MOTROL – 2010. – Том. 12А. – С. 7-14.

6. **Чередниченко А. К.** Мобильные газотурбинные установки с промежуточным теплоносителем [Текст] / А.К. Чередниченко // MOTROL – 2011. – Том. 13А. – С. 25-30.

7. **Ткач М. Р.** Газотурбинные установки сложных циклов с промежуточным теплоносителем [Текст] / М.Р. Ткач, А.К. Чередниченко, Б.Г. Тимошевский, Н.В. Ващиленко // Газотурбинные технологии. – 2011. – №10 (101). – С.38-40. *Автором доведена перспективність застосування проміжного теплоносія в ГТД складних циклів різного складу.*

8. **Ткач М. Р.** Анализ влияния параметров промежуточного теплоносителя на характеристики регенеративного ГТД [Текст] / М.Р. Ткач, А.К. Чередниченко, Б.Г. Тимошевский, Н.В. Ващиленко // Газотурбинные технологии. – 2012. – №1 (102). – С.34-36. *Автором встановлений діапазон відносного температурного напору та умови мінімізації габаритів теплообмінників регенеративного ГТД з проміжним теплоносієм.*

9. **Чередниченко А. К.** Экспериментальная база для исследования конверсии биоэтанола регенерацией сбросного тепла газотурбинного двигателя [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // MOTROL. – 2012. – Том. 14. – С. 13-21. *Автором розроблена схема експериментального стенду та система вимірювання характеристик.*

10. **Ткач М. Р.** Термохимическая регенерация вторичных энергоресурсов тепловых двигателей. Часть 1 [Текст] / М.Р. Ткач, А.К. Чередниченко, Б.Г.

Тимошевский // Газотурбинные технологии. – 2012. – №9 (110). – С.34-39.
Автором доведена перспективність термохімічної обробки палив за рахунок підводу теплоти відпрацьованих газів газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних установок.

11. **Чередниченко А.К.** Показатели газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла [Текст] / А.К. Чередниченко, О.В. Ощип // MOTROL. – 2013. – Vol. 15, № 2. – С.165-170. *Автором доведено, що утилізація вторинних енергоресурсів двигунів газотурбінних судових енергетичних установок шляхом термохімічної обробки вуглеводневих палив забезпечує збільшення ККД установки відносно контактних газо-паротурбінних установок.*

12. **Чередниченко А.К.** Исследование эффективности дизель-газотурбинной энергетической установки с термохимической регенерации тепла [Текст] / А.К. Чередниченко // MOTROL. – 2015. – Vol. 17, №2. – С.25-28.

13. **Чередниченко А.К.** Критерии выбора состава энергетической установки газовоза LNG [Текст] / А.К. Чередниченко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. – 2016. – №2. – С. 176-179.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. **Горбов В. М.** Обеспечение функционального резервирования мощности пропульсивного комплекса на газотурбоэлектроходах [Текст] / В.М.Горбов, А.К. Чередниченко // Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов: Тез. доп. Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2007. С. 15-16. *Автор провів дослідження структурних схем та аналіз шляхів резервування потужності.*

2. **Чередниченко А. К.** Повышение тепловой экономичности ГТУ за счет регулирования температуры воздуха на входе ГТД [Текст] / А.К. Чередниченко, Д.В. Димо // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. III Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2007, – С. 42-43. *Автор розробив математичну модель установки .*

3. **Чередниченко А. К.** Повышение эффективности энергетических установок путем термохимической регенерации [Текст] // Муніципальна

енергетика: проблеми, рішення / Збірник наукових праць III Міжнарод. наук.-техн. конф.- Миколаїв: НУК, 2009. с. 83-84.

4. **Чередниченко А. К.** Улучшение экологических характеристик мобильных энергокомплексов термохимической регенерацией вторичных энергоресурсов [Електронне видання] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні/ Матеріали V Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010 (Режим доступу: <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail?conferenceId=7&lectureId=1373>)

Автор визначив шляхи застосування термохімічної регенерації та довів вплив параметрів транспортних теплових двигунів на ефективність процесу ТХР.

5. **Чередниченко А. К.** Повышение надежности и экологической безопасности мобильных энергокомплексов высокотехнологичных объектов [Електронне видання] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні/ Матеріали V Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010 (Режим доступу: <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail?conferenceId=7&lectureId=1373>)

Автор проаналізував вплив застосування термохімічної утилізації на ефективність та екологічність установки.

6. **Чередниченко А. К.** Газотурбинные установки с промежуточным теплоносителем для судов FPSO – инновационные энергетические комплексы [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач, Н.В. Ващиленко // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці/ Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010, с.158-159. *Автор проаналізував можливість застосування проміжного теплоносія в судових умовах*

7. **Чередниченко А. К.** Оценка значимости критериев выбора состава установки судового энергокомплекса [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці// Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010, с.195-197.

8. **Чередниченко А. К.** Улучшение экологических показателей газотурбинной установки применением промежуточного теплоносителя [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці/

Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010, с.337-338. *Автор виконав розрахунок процесу ГТУ з проміжним теплоносієм.*

9. **Чередниченко А. К.** Определение параметров регенератора ГТД с промежуточным теплоносителем [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Сучасний стан та проблеми двигунобудування / Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010, с.92-93. *Автор розробив математичну модель ГТУ з проміжним теплоносієм.*

10. **Чередниченко А. К.** О рациональных параметрах промежуточного теплоносителя регенеративного теплообменника газотурбинного двигателя [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Сучасний стан та проблеми двигунобудування / Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010, с.94-95. *Автор виконав розрахунок параметрів теплової схеми ГТУ з проміжним теплоносієм.*

11. **Чередниченко А. К.** Улучшение экологических характеристик газотурбинных энергетических комплексов применением воздушной утилизации с промежуточным теплоносителем [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач, Н.В. Ващиленко// Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні Матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011, с.26-28. *Автор виконав аналіз впливу схем ГТД з проміжним теплоносієм на екологічні характеристики двигуна.*

12. **Чередниченко А. К.** Применение газотурбинных установок сложных циклов в составе энергокомплексов объектов океанотехники [Текст] / Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні Матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011, с.49-52.

13. **Чередниченко А. К.** Інноваційні енергокомплекси на базі газотурбінних двигунів з рідинно-металевим теплоносієм [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці/ Матеріали II Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011, с.219-221. *Автор розробив компоновальні схеми іноваційних енергокомплексів морського виконання.*

14. **Чередниченко А. К.** Анализ применимости методов конверсии углеводородного топлива для газотурбинных энергокомплексов морских объектов нефтегазодобычи [Текст] / А.К. Чередниченко, О.В. Ощип // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. V Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011, – С. 96-98.

15. **Чередниченко А. К.** Анализ влияния параметров промежуточного жидкометаллического теплоносителя на характеристики регенеративного газотурбинного двигателя [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. V Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011, – С. 175-176. *Автором запропонований алгоритм розрахунку який враховує взаємний вплив теплообмінних апаратів на габаритні характеристики.*

16. **Чередниченко А.К.** Применение жидкометаллического промежуточного теплоносителя в системах воздушного аккумулирования энергии [Текст] /А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Муниципальна енергетика: проблеми, рішення / Збірник наукових праць IV Міжнарод. наук.-техн. конф.- Миколаїв: НУК, 2011. с. 66-67. *Автором виконаний аналіз впливу характеристик проміжного теплоносія на ефективність систем акумулювання енергії.*

17. **Чередниченко А. К.** Снижение теплового загрязнения регенерацией тепла в установках с промежуточным теплоносителем [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач// Проблемы экології та енергозбереження в суднобудуванні Матеріали VII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2012, с.58. *Автором проаналізовані екологічні характеристики регенеративного ГТД з промтеплоносієм та запропоновані структурні схеми установок.*

18. **Чередниченко А. К.** Применение промежуточного теплоносителя в составе энергокомплекса с термохимической конверсией биоэтанола [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці/ Матеріали III Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2012, с.235-236. *Автором розраховані ключові параметри циклу з термохімічною конверсією етанолу.*

19. **Череди́ченко А. К.** Модернизация экспериментальной базы для исследования процессов термохимической регенерации сбросного тепла газотурбинного двигателя [Текст] / А.К. Череди́ченко, М.Р. Ткач // Сучасний стан та проблеми двигунобудування / Матеріали II Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2012, с.190-191. *Автором розроблена схема експериментального стенду та системи вимірювання.*

20. **Череди́ченко А. К.** Рациональные диапазоны применения основных способов регенерации тепла [Текст] / А.К. Череди́ченко, М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський // XVIII – міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2013. – С. 110. *Автором проаналізовані структурні схеми та надана оцінка масогабаритних характеристик теплообмінних апаратів.*

21. **Череди́ченко А. К.** Перспективные методы регенерации тепла в энергетических установках [Текст] / А.К. Череди́ченко, М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2013, – С. 28-31. *Автором надана оцінка існуючих методів регенерації тепла та виконане їх порівняння з термохімічними технологіями.*

22. **Череди́ченко А. К.** Повышение эффективности комбинированной энергетической установки путем термохимической конверсии углеводородных топлив [Текст] / А.К. Череди́ченко, М.Р. Ткач // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2013, – С. 47-49. *Автором створена математична модель установки та виконаний розрахунок характеристик для різних вуглеводневих палив.*

23. **Череди́ченко О. К.** Безперервне вимірювання теплоти згоряння суміші газів парової конверсії спиртів [Текст] / О.К. Череди́ченко, М.Р. Ткач // Муниципальна енергетика: проблеми, рішення / Збірник наукових праць V Міжнарод. наук.-техн. конф.- Миколаїв: НУК, 2013. с. 160-162. *Автором запропонований спосіб вимірювання теплоти згоряння суміші газів парової конверсії.*

24. **Чередниченко А. К.** Выбор параметров промежуточного теплоносителя для воздушно-аккумулирующих газотурбинных электростанций [Текст] / Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2014, с. 125-126.

25. **Чередниченко А. К.** Моделирование процесса паровой конверсии биоэтанола в схеме газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла [Текст] / А.К. Чередниченко, А.К. Басов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали V Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2014, с.220-221. *Автором виконаний розрахунок схеми та подальший аналіз параметрів процесів конверсії.*

26. **Чередниченко А. К.** Когенерационные энергетические комплексы с промежуточным теплоносителем [Текст] / Сучасний стан та проблеми двигунобудування. Матеріали III Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2014, с.17-18.

27. **Чередниченко А. К.** Анализ состава энергетических установок газозовозов [Текст] / Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті. Матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2015, с. 329-331.

28. **Чередниченко А. К.** Исследование эффективности термохимической регенерации тепла в энергетической установке газозова LNG [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2015, с.184-185.

29. **Чередниченко А. К.** Влияние состава перевозимого газозовом LNG груза на эффективность энергетической установки с термохимической регенерацией тепла [Текст] / О.К. Чередніченко, М.Р. Ткач // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 6 Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2015, с. 82-83. *Автором адаптована існуюча модель випару вантажу та виконаний розрахунок параметрів процесів термохімічної обробки палива на ефективність СЕУ.*

30. **Череди́ченко А. К.** Development of advanced Propulsion Plant for LNG carrier [Текст] / Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VII Міжнарод. наук.-техн. конф. Часть 1. – Миколаїв: НУК, 2015, – С. 59-62.

31. **Череди́ченко А. К.** Учет гидрометеорологических факторов при математическом моделировании условий эксплуатации судомеханического комплекса газовоза LNG [Текст] / А.К. Череди́ченко, Б.М. Личко // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VII Міжнарод. наук.-техн. конф. Часть 1. – Миколаїв: НУК, 2015, – С. 227-232. *Автором виконаний розрахунок впливу параметрів навколишнього середовища на ефективність процесів термохімічної обробки випару вантажу.*

32. **Череди́ченко А. К.** Многоуровневая декомпозиция в экспериментальном исследовании судовых энергетических установок [Текст] / Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті. Матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2016, с. 397-398.

33. **Череди́ченко А. К.** Комплексное исследование эффективности судовых энергетических установок газовозов LNG с термохимической регенерацией тепла [Електронне видання] / Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні Матеріали XI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2016. <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail?lectureId=36342&conferenceId=35927&isProjectorView=false>

34. **Череди́ченко А. К.** Математическое моделирование процессов в судовых энергетических установках с термохимической регенерацией тепла [Текст] / Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 7 Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2016, с. 87.

35. **Череди́ченко А. К.** Исследование характеристики энергокомплексов с термохимической регенерацией для объектов океанотехники [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали VII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2016, с.153-154.

36. **Череди́ченко А. К.** Применение объектно-ориентированных подходов при исследованиях элементов энергетических установок с термохимической

регенерацией сбросного тепла [Текст] / Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування. Матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2016, с.11-12.

37. **Чередниченко А. К.** Performance Analysis of Combined Gas Turbine – Diesel Power Plant with Thermo Chemical Recuperation of Waste Heat [Текст] / Сучасний стан та проблеми двигунобудування. Матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2016, с.5-9.

38. **Чередниченко А. К.** Эффективность использования выпара груза в перспективных энергетических установках судов газозовов [Текст] / Казахстан-Холод 2017: Сб. докл. межд.науч.-техн. конф. – Алматы: АТУ, 2017. С. 264-267.

39. **Чередниченко А. К.** Экологические аспекты использования выпара груза в перспективных энергетических установках судов газозовов [Текст] / Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні Матеріали XII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2017, с.61-65.

40. **Чередниченко А. К.** Применение методологии системной динамики при моделировании процессов в перспективных энергетических установках газозовов [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали VIII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2017, с.171-172.

41. **Чередніченко О. К.** Дослідження енергетичних витрат на привід установки подачі газу для головних двигунів суден газозовів [Текст] / А.К. Чередниченко, Н.В. Коробейнікова, В.О. Карташов // Холод в енергетиці і на транспорті. Збірник наукових праці IV Міжнародної науково-технічної конференції. –Миколаїв: НУК, 2017. – с. 281-283. *Автором створена математична модель установки та виконаний аналіз енергетичних витрат на привід установки подачі газу до головних двигунів.*

42. **Чередниченко А. К.** Комплексное исследование эффективности применения термохимических технологий в судовых энергетических установках газозовов [Текст] / Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VIII Міжнарод. наук.-техн. конф. Часть 1. – Миколаїв: НУК, 2017, – С. 32-37.

43. **Чередниченко А.К.** Моделирование эксплуатационных характеристик пропульсивных комплексов судов газозовов с учетом влияния

гидрометеорологических факторов [Текст] / А.К. Чередниченко, Б.М. Личко // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VII Міжнарод. наук.-техн. конф. Часть 1. – Миколаїв: НУК, 2017, – С. 99-101. *Автором проаналізований вплив гідрометеорологічних факторів на індекс енергоефективності судна газовозу.*

44. **Чередніченко А. К.** Исследование эффективности судовой комбинированной энергетической установки с термохимической утилизацией вторичных энергоресурсов [Текст] / Муніципальна енергетика: проблеми, рішення / Збірник наукових праць VII Міжнарод. наук.-техн. конф.- Миколаїв: НУК, 2017. с. 110-117.

45. **Cherednichenko O. C.** The estimation of power consumption of gas preparation unit for marine dual-fuel propulsion engines / Kazakhstan-Refrigeration 2018: Proceedings of the Conference. – Almaty: ATU, 2018. – с.199-201.

46. **Cherednichenko O. C.** Mathematical modeling of processes in advanced power plants of gas carriers / Materials of XIII International scientific-technical conference WATER TRANSPORT PROBLEMS – Baki: Azerbaijan State Marine Academy, 2018. – p.145-149.

47. **Чередниченко А. К.** Анализ эффективности транспортной энергетической установки с термохимической утилизацией сбросного тепла [Текст] / Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 9 Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2018, с. 99–200.

48. **Чередниченко А. К.** Дослідження впливу характеристик палив на ефективність використання термохімічних технологій в енергетичних установках суден та об'єктів океанотехніки [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали IX Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2018, с. 71-72.

49. **Чередніченко О. К.** Енергоефективність судових енергетичних установок з термохімічним перетворенням енергії [Текст] / Сучасний стан та проблеми двигунобудування. Матеріали V Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2018, с.14-15.

50. **Чередниченко А. К.** Термохимические технологии утилизации вторичных энергоресурсов судовых энергетических установок [Текст] / А.К. Чередниченко, Н.В. Коробейникова // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 10 Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2019, с. 158–160. *Автором наданий комплексний аналіз ефективності термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів в установках різного конструктивного виконання.*

51. **Чередниченко А. К.** Підвищення ефективності енергетичних установок високотехнологічних суден використанням термохімічної утилізації [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали X Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2019, с. 406-411.

52. **Чередниченко А. К.** Розробка технології термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів теплових двигунів судових енергетичних установок [Текст] / Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. IX Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2019, – С. 18-21.

Основні положення та результати проведених досліджень відображено в 93 друкованих наукових працях, з них 25 основних публікацій, у тому числі 16 у наукових спеціалізованих виданнях, рекомендованих переліком ДАК МОН України (з них 9 без співавторів), 8 публікацій у іноземних фахових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science Core Collection (з них 1 без співавторів) та 1 монографія (у співавторстві); до додаткових публікацій належать 3 патенти на винахід, 13 публікацій у фахових виданнях (з них 3 без співавторів), 52 тези доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій (з них 27 без співавторів).

Відомості про апробацію результатів дисертації

• Основні положення і результати досліджень обговорювалися на таких заходах: I – XI Міжнародних науково-технічних конференціях «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2010 – 2019); III – IX Міжнародних науково-технічних конференціях «Суднова енергетика: стан та проблеми»

(Миколаїв, 2007 – 2019); II – VIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення» (Миколаїв, 2007 – 2019); I – V Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (Миколаїв, 2010 – 2018); V – XII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні» (Миколаїв, 2010 – 2017); IV, V, VII, VIII, X, XI Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» (Херсон, 2013, 2014, 2016, 2017, 2019, 2020); VII, VIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (Херсон, 2015, 2016); XI, XII, XIII International scientific-technical conferences «Water transport problems» (Bakı, 2016 – 2018); VII, VIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Казахстан – Холод» (Алмати, 2017, 2018); «First Polar Equipment Technology Innovation Forum» (Harbin, 2018); XIV – XVII, XXI, XXII, XXIV Міжнародних конгресах двигунобудівників (Харків-Рибаче-Коблево, 2009 – 2012, 2016, 2017, 2019).

Основні наукові положення та результати, що представлені у дисертації, отримані особисто автором в період з 2008 по 2020 роки в Науково-дослідному інституті енергетики та машинобудування Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Одноосібні наукові праці виконані автором особисто і самостійно, а внесок автора у праці, написані у співавторстві, зазначений біля кожної публікації.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків і 4 додатків. У додатках наведені акти, що підтверджують впровадження результатів досліджень та інші матеріали. Обсяг дисертації складає 382 сторінки, у т. ч. 273 сторінки основного машинописного тексту, 146 рисунків, 44 таблиці. Список використаних джерел містить 295 найменувань (на 35 сторінках). Додатки розміщені на 27 сторінках.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛИК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	41
ВСТУП	46
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	57
1.1. Тенденції світового енергоспоживання	57
1.2. Аналіз сучасного стану світового флоту та морських об'єктів нафтогазовидобування	61
1.2.1 Визначення ознак високотехнологічних суден	61
1.2.2 Тенденції розвитку морських об'єктів нафтогазовидобування та високотехнологічних суден	64
1.3. Постановка мети та задач досліджень	76
Висновки за першим розділом	85
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	87
2.1. Загальна методологія дисертаційного дослідження	87
2.2. Адаптація об'єктно-орієнтованих підходів до розв'язання задач дослідження суднових енергетичних установок з термохімічною утилізацією	90
2.2.1 Методологія теоретичних досліджень	90
2.2.2 Методологія експериментальних досліджень	98
Висновки за другим розділом	111
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ СУДЕН І МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВИДОБУВАННЯ НА ПРОЦЕСИ ТЕРМОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ ПАЛИВА	113
3.1. Розробка багаторівневої класифікації схем енергетичних установок високотехнологічних суден та морських об'єктів нафтогазовидобування	113

3.2.	Аналіз складу та характеристик енергетичних установок високотехнологічних суден та морських об'єктів нафтогазовидобування	119
3.2.1	Енергетичні установки морських об'єктів нафтогазовидобування	119
3.2.2	Енергетичні установки суден-газовозів та круїзних лайнерів	125
3.2.3	Оцінка параметрів суднових теплових двигунів, які впливають на ефективність термохімічної утилізації теплоти вторинних енергоресурсів	129
3.3.	Оцінка ефективності термохімічної обробки базового вуглеводневого палива шляхом утилізації вторинних енергоресурсів	132
3.3.1	Виявлення перспективних базових палив для термохімічної обробки	132
3.3.2	Узагальнена оцінка ефективності термохімічної обробки палива	136
3.3.3	Вплив основних параметрів процесів парової конверсії на ефективність термохімічної обробки вуглеводневого палива	140
3.4	Експериментальні дослідження закономірностей процесів в елементах систем термохімічної обробки палива шляхом утилізації скидної теплоти	162
3.4.1	Методика проведення експериментальних досліджень	162
3.4.2	Результати експериментальних досліджень	166
	Висновки за третім розділом	172
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МОДУЛЯХ З ТЕРМОХІМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ		175
4.1.	Розробка моделі енергетичного модуля з термохімічною утилізацією вторинних енергоресурсів теплових двигунів	175
4.2.	Математичні моделі підсистем енергетичного модулю	180

4.2.1 Математичні моделі основних елементів підсистеми термохімічної утилізації та перетворення енергії	180
4.2.2 Математична модель енергетичної підсистеми та її основних елементів	188
4.2.3 Алгоритм моделювання процесів в енергетичному модулі з термохімічною системою утилізації	193
Висновки за четвертим розділом	195
РОЗДІЛ 5. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МОДУЛІВ З ТЕРМОХІМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ	197
5.1. Теоретичні дослідження параметрів суднових енергетичних модулів з використанням термохімічної обробки палива	197
5.1.1 Газотурбінні енергетичні модулі з підсистемами термохімічної обробки палива	198
5.1.2 Комбіновані дизель-газотурбінні енергетичні комплекси з підсистемами термохімічної обробки палива	227
5.2. Теоретичні дослідження параметрів суднових енергетичних модулів з використанням термохімічної технології перетворення енергії в металогідридних утилізаційних установках	242
Висновки за п'ятим розділом	247
РОЗДІЛ 6. РАЦІОНАЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ В НИЗЬКОЕМІСІЙНИХ КАМЕРАХ ЗГОРЯННЯ СУДНОВИХ ГАЗОТУРБІННИХ МОДУЛІВ ПРИ РОБОТІ НА ПРОДУКТАХ ТЕРМОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ ПАЛИВА	249
6.1. Розробка математичної моделі газотурбінної камери згоряння, що працює на продуктах термохімічної конверсії	249
6.1.1 Обґрунтування вибору моделі турбулентності газових потоків	249
6.1.2 Вибір моделей хімічного реагування багатокомпонентної газової суміші	252

6.1.3	Вибір кінетичного механізму горіння продуктів термохімічної конверсії	255
6.2.	Перевірка адекватності розробленої моделі хімічно реагуючих потоків	257
6.3.	Дослідження характеристик робочого процесу в газотурбінній камері згоряння при роботі на продуктах термохімічної конверсії попутного газу	258
	Висновки за шостим розділом	269
РАЗДЕЛ 7. АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ СУДЕН І МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВИДОБУВАННЯ		
		271
7.1.	Основні напрямки впровадження	271
7.2.	Реалізація результатів дослідження в практиках проектування енергетичних комплексів високотехнологічних суден	273
	7.2.1. Енергетичні комплекси газозовів LNG та LPG	273
	7.2.2. Енергетичні комплекси круїзних лайнерів та суден Ro-рах	287
7.3.	Еколого-економічне обґрунтування доцільності використання термохімічних технологій в суднових енергетичних установках високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування	292
7.4.	Перспективи застосування наукових і практичних положень та визначення напрямів подальших досліджень	300
7.5.	Ефективність результатів впровадження	309
	Висновки за сьомим розділом	312
ВИСНОВКИ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ		315
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ		320
ДОДАТКИ		356

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ, ІНДЕКСИ, БЕЗРОЗМІРНІ ВЕЛИЧИНИ, СКОРОЧЕННЯ

Позначення

CC – масовий вміст вуглецю у суміші;

$c_p \Big|_{T_1}^{T_2}$ – середня масова ізобарна теплоємність в діапазоні температур

$(T_1 \dots T_2)$, кДж/(кг·К);

d – діаметр, м;

D – дизельний двигун; декомпозиція;

DF – двопаливний двигун;

D_r – пряма передача потужності;

f – фугітивність; конструктивні особливості судна ; метеорологічні параметри;

G, g – масова витрата, кг/с; відносна витрата;

H_v - нижча теплотворна здатність, МДж/кг;

h – питома ентальпія, кДж/кг;

i – кількість;

K – коефіцієнт;

k – коефіцієнт, номер блоку або елементу, показник адіабати процесу;

l – номер енергоносія;

M – маса, кг;

N – кількість замірів;

n – частота обертання, с⁻¹; кількість параметрів;

Q , – кількість теплоти, теплова потужність, кДж/кг;

P, p – коефіцієнт; тиск, Па;

P_e – потужність, кВт,

R – газова стала, кДж/(кг·К); коефіцієнт детермінації;

T – температура, К;

V, ν – об'єм, м³; питомий об'єм, м³/кг;

U, u – питома внутрішня енергія, кДж/кг;

X – параметри СЕУ;

$Y_i, Y_{i_{\text{ГТД}}}$ – значення функції в i -й точці; i -го параметру ГТД;

Δh – наявний теплоперепад, кДж/кг;

ΔP – тиск насосу, Па; опір, Па;

ΔS – зміна ентропії

ΔH – зміна ентальпії

ΔT – температурний напір, К; температурний перепад, К;

α – коефіцієнти надлишку повітря, тепловіддачі та витрати компресору;

β – коефіцієнти витрати турбіни та камери згоряння ГТД;

ε – порівняльна похибка;

η – коефіцієнт корисної дії;

ρ – густина, кг/м³;

π_K, π_T – ступінь підвищення тиску; ступінь розширення;

τ – час, с;

ν – коефіцієнт відновлення повного тиску;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

ζ – ступінь конверсії

Індекси

B – базове паливо;

K – продукти конверсії;

Air – повітря;

Mixture – суміш;

THR – параметри процесу термохімічної обробки палива;

in – параметри на вході;

out – параметри на виході;

Syngas – синтез-газ;

min – мінімальне значення;
max – максимальне значення;
n – номер ланки

Скорочення

ВЕР – вторинні енергоресурси;
ВМТ – верхня мертва точка
ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння;
ДП НВКГ – Державне підприємство «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування»;
ГТД – газотурбінний двигун;
К – компресор;
КЗ – камера згоряння;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
КЯ – клас явищ;
МОД – малообертовий двигун;
ОУ – опріснювальна установка;
ПГ – попутний газ;
ПKE – продукти конверсії етанолу;
ПТУ – паротурбінна установка;
СЕУ – суднова енергетична установка;
СОД – середньобертовий двигун;
Т – турбіна;
ТА – теплообмінний апарат;
ТBT – турбіна високого тиску;
ТД – тепловий двигун;
ТЕН – трубчастий електронагрівник;
ТНТ – турбіна низького тиску;
ТУК – теплоутилізаційний контур;
ТХР – термохімічний реактор, термохімічна регенерація;
ТХСУ – термохімічна система утилізації,

ТХТУ – термохімічна технологія утилізації;
ТХУ – термохімічна утилізація;
УК – утилізаційний котел;
УПГ – утилізаційний парогенератор;
ЦПЕТ НДІ ЕМ НУК – Центр перспективних енергетичних технологій науково-дослідного інституту «Енергетики та Машинобудування» Національного університету кораблебудування імені адм. Макарова;
АНТС – Anchor Handling Tug Supply Vessel – буксир для встановлення та обробки якорів;
BOG– Boil-Off Gas – втрати газу, що випарувався в процесі транспортування;
BOR–Boil-Off Rate – швидкість випаровування вантажу;
CNG – Compressed Natural Gas – стиснутий природний газ;
DLE – Dry Low Emissions камера низькоемісійна з сухим способом зменшення емісії;
EEDI – Energy Efficiency Design Index – конструктивний індекс енергетичної ефективності судна;
EEOI – Energy Efficiency Operational Index – операційний індекс енергетичної ефективності судна;
FPSO – Floating Production Storage And Offloading System – плавуча система для видобутку, зберігання і відвантаження нафти;
FPSS – Semi-submersible Floating Production System – напівзаглиблена плавуча виробнича система;
FPU – Floating Production Units – плавучі виробничі об'єкти та об'єкти зберігання і перевантаження;
FSO – Floating Storage Offloading Unit – плавуча система для зберігання та відвантаження нафти;
FSRU – Floating Storage And Regasification Unit - плавуча установка для зберігання та регазифікації;
GTL – Gas To Liquids – синтетичне рідке паливо;
HFO – Heavy Fuel Oil – важке нафтове паливо;

IG – Ideal Gas – ідеальний газ;
IGU – International Gas Union – Міжнародний газовий союз;
IMO International maritime organization – Міжнародна морська організація
ISO – International Organization for Standardization – Міжнародна організація зі стандартизації;
LNG – Liquefied Natural Gas – зріджений природний газ;
LPG – Liquefied Petroleum Gas – зріджений нафтовий газ;
MDO – Marine Diesel Oil – легке нафтове паливо;
MN – Methane Number –метанове число;
MODU – Mobile Offshore Drilling Units – мобільні офшорні бурові об'єкти;
OSV – Offshore Service Vessels – обслуговуючі офшорні судна;
PSV – Platform Supply Vessel – судно постачання морських платформ;
SPAR – Spar Platform – платформа типу SPAR;
TLP – Tension-Leg Platform – платформа з натяжним вертикальним якірним кріпленням;
UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development;
Міжнародний комітет ООН з торгівлі та співробітництва;
SU–Storage Units – плавучі об'єкти зберігання і перевантаження

ВСТУП

Забезпечення стійкості світової економіки формує стабільний попит на нафту і газ, у той же час спостерігається зниження кількості перспективних материкових родовищ. Вектор видобутку вуглеводнів неухильно зміщується в область континентального шельфу. Процес видобутку нафти і газу з морського шельфу є енергоємним, а з ростом глибини видобутку витрати енергії значно зростають. Все це вимагає втілення нових технологій в енергетичні комплекси морських об'єктів нафтогазовидобування.

Широка географія світової торгівлі підсилює вплив транспортної системи та її основного компоненту – транспортування вантажів морем на стан світової економіки. Згідно зі звітом United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) понад 70 % вартості світової торгівлі перевозиться на борту більш ніж 54 тисяч морських суден. Посилюється контроль за забрудненням моря при їх експлуатації. Вимоги законодавчих актів ІМО (International Maritime Organization) жорстко регламентують викиди шкідливих речовин від об'єктів судноплавства.

Підвищення ефективності використання потенціалу енергоносіїв в сукупності з мінімізацією шкоди навколишньому середовищу – парадигма проектування енергетичного обладнання в сучасному світі. В першу чергу це відноситься до високотехнологічних (technology-intensive) суден, до яких можуть бути віднесені офшорні судна, пасажирські судна (включаючи круїзні лайнери і пороми) та газовози LNG/LPG.

Необхідність виконання вимог законодавчих актів ІМО щодо зниження впливу суднової енергетики на навколишнє середовище визначає **запит практики**, спрямований на розробку та адаптацію енергоефективних технологій в суднову енергетику шляхом комплексного впровадження новітніх установок, визначення діапазонів їх досяжних параметрів з розробкою науково обґрунтованих перспективних схемних рішень, які забезпечують підвищення ефективності використання паливних ресурсів, мінімізацію викидів CO₂ та інших шкідливих речовин в навколишнє середовище.

Термохімічні технології перетворення енергії дозволяють поліпшити не тільки показники енергоефективності, а й екологічні характеристики енергетичних установок високотехнологічних суден та морських об'єктів.

У теперішній час практично відсутні комплексні дослідження ефективності енергетичних установок морського виконання на базі утилізаційних термохімічних технологій, проте важливим аспектам загальної проблеми удосконалення енергоперетворення в СЕУ присвячено роботи відомих вітчизняних організацій: ДП НВКГ "Зоря" – "Машпроект", НТУ "ХПІ", НТТУ «КПІ», НУК, НУ «ОМУ», ОНМУ, ЦКБ "Чорноморсуднопроект", ІТТФ НАН України, вчених та фахівців (роботи професорів Р.А. Варбанця, В.А. Голікова, М.О. Дикого, Н.Г. Лебедя, В.В. Маслова, В.І. Романова, Г.Ф. Романовського, Я.Х. Сороки, О.І. Тарасова, А.П. Шевцова, А.Я. Шквара, В.П. Шостака, А.А. Халатова, С.А. Ханмамедова та інших).

Розглядом різних аспектів проблеми підвищення ефективності енергетичних установок, в тому числі і за рахунок термохімічної регенерації відпрацьованих газів теплових двигунів, займаються різні наукові, проєктні та виробничі організації за кордоном Wärtsilä (Фінляндія), Gas Technology Institute (США), Technion – Israel Institute of Technology (Ізраїль), Harbin Engineering University (КНР), Samara State Technical University (РФ) та ін. В рішенні цих проблем задіяні також наукові організації України. Так, в Інституті технічної теплофізики НАН України під керівництвом проф. В.Г. Носача досліджувались теоретичні питання створення технологій термохімічної регенерації скидної теплоти технологічного обладнання. Наукові дослідження, пов'язані з встановленням закономірностей термохімічних процесів енергоперетворення, а також розробкою термохімічних технологій на протязі останніх років виконуються в Машинобудівному навчально-науковому інституті Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Незважаючи на велику кількість досліджень в області термохімічної утилізації (серед них роботи А.А. Шрайбера, В.Ф. Каменева, Н.Л. Хрипча, J.M. Protopas, D. I. Pashchenko, A. Poran, L. Tartakovsky та інших), недостатньо уваги приділено дослідженню ефективності схемних рішень газотурбінних та комбінованих енергетичних установок суден та морських об'єктів нафтогазовидобування на

базі енергетичних комплексів, які застосовують термохімічні технології. Відсутні системні дослідження особливостей використання металогібридних утилізаційних установок та її впливу на енергоефективність суднових пропульсивних комплексів.

Таким чином, **науково-прикладна проблема**, що розглянута у дисертації, – підвищення ефективності використання паливних ресурсів та зменшення викидів токсичних компонентів шляхом раціональної організації перетворень енергії в термохімічних системах утилізації теплоти вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування є актуальною та має значний практичний інтерес.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати дисертаційної роботи отримано в рамках Пріоритетних напрямків розвитку науки й техніки в Україні: напрямок 3 «Енергетика та енергоефективність» відповідно до тематичного плану фундаментальних науково-дослідних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова: № 0115U000298 «Теоретичні основи підвищення стійкості процесів горіння вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згорання газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних стабілізаторів», № 01112U000349 «Системні дослідження та розробка моделей програмно-цільового розвитку систем теплопостачання України на основі новітніх технологій та процесів енергоперетворення», № 0111U002309 «Теоретичні основи процесів плазмохімічної переробки низькосортного вугілля і використання синтез-газу в газотурбінних установках», № 0111U007280 «Новітня технологія спалювання палив з плазмовим супроводом для енергетичних систем», № М/107-2019 «Розробка передової технології SOFC-GT для суднових енергосистем», в яких автор приймав участь в якості виконавця.

Мета дослідження – є підвищення ефективності суднових енергетичних установок з термохімічними системами утилізації теплоти вторинних енергоресурсів для високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

Задачі наукового дослідження:

1. Аналіз тенденцій світового енергоспоживання та оцінка перспективності застосування термохімічних систем утилізації теплоти вторинних енергоресурсів в судновій енергетиці на базі узагальнення та систематизації масиву значень, які описують енергетичні установки високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.
2. Виявлення шляхом математичного і фізичного моделювання діапазону ефективного застосування перспективних палив при термохімічній обробці шляхом утилізації вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.
3. Виявлення закономірностей взаємного впливу характеристик термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив та параметрів робочих процесів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.
4. Розробка науково обґрунтованих нових схемних рішень газотурбінних і комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних установок з термохімічними системами утилізації теплоти вторинних енергоресурсів та дослідження впливу їх параметрів на енергоефективність.
5. Визначення умов ефективного спалювання продуктів термохімічної обробки палив в газотурбінних камерах згоряння з попереднім частковим перемішування палива з повітрям.
6. Теоретичні дослідження процесів спалювання продуктів термохімічної обробки палива в газотурбінній камері згоряння з попереднім частковим перемішування палива та окиснювача.
7. Визначення параметрів ефективного перетворення енергії в металогідридних утилізаційних установках сучасних та перспективних суден-газовозів.
8. Апробація положень концепції підвищення ефективності енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування та впровадження результатів наукових досліджень.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення енергії в енергетичних установках при термохімічній утилізації вторинних енергоресурсів.

Предмет дослідження – закономірності процесів термохімічних перетворень енергії, їх вплив на ефективність енергетичних установок для високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

Методи дослідження:

- системний аналіз процесів перетворення енергії при оцінці ефективності схемних рішень та виявленні взаємозв'язків елементів суднових енергетичних установок з термохімічними системами;
- об'єктно-орієнтований підхід при розробці багаторівневої класифікації схем енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування;
- математичне та фізичне моделювання з використанням обчислювальних та фізичних експериментів при виявленні закономірностей впливу параметрів робочих процесів енергетичних установок на компонентний склад та енергетичні характеристики продуктів термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив;
- метод тривимірного моделювання при дослідженні процесів горіння вуглеводневих та спиртових палив в газотурбінних камерах згорання;
- статистичні методи при обробці даних та встановленні регресійних залежностей;
- розрахунково-аналітичні методи досліджень, які базуються на законах термодинаміки та системах балансових рівнянь, при визначенні закономірностей процесів термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів суднових енергетичних установок.

За результатами виконаних наукових досліджень розроблено концепцію підвищення ефективності суднових енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування шляхом термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив за рахунок підводу теплоти відпрацьованих газів газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних установок, а також використанням потенціалу вторинних енергоресурсів малообертових дизельних двигунів термохімічним перетворенням енергії в утилізаційних металогідридних установках.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному

1. Вперше визначено діапазон ефективного застосування низки вуглеводневих та спиртових палив для термохімічної обробки шляхом утилізації вторинних енергоресурсів енергетичних установок, при цьому виявлено: а) потенціал вторинних енергоресурсів установок на базі газотурбінних двигунів забезпечує ефективну обробку метанолу та етанолу з максимальним приростом теплоти згоряння палива 18–22 %, а також помірну ефективність обробки природного газу, попутного газу та їх головних складових при максимальному прирості 8–12 %; б) потенціал вторинних енергоресурсів установок на базі чотирьохтактних дизельних двигунів забезпечує ефективну обробку метанолу та етанолу з приростом теплоти згоряння до 20–22 і 15–16 % відповідно; в) температурний потенціал скидної теплоти установок на базі двохтактних дизельних двигунів достатній для ефективних перетворень енергії в металогідридних утилізаційних установках.

2. Вперше доведено, що на відміну від існуючих суднових енергетичних установок без термохімічної обробки палива, термохімічна обробка вищевказаних спиртових та вуглеводневих палив за рахунок утилізації вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден приводить до покращення співвідношення величин викидів CO₂ на одиницю транспортної роботи судна та, відповідно, до зменшення індексу EEDI на: 25–40 % для газовозів LNG з єдиною електроенергетичною установкою; на 30–42 % для газовозів LPG порівняно з енергокомплексами, які працюють на нафтових паливах, та на 22–24 % порівняно з енергокомплексами, які працюють на LPG; на 15–25 % для круїзних суден відносно енергокомплексів, які працюють на нафтових паливах, та на 10–15 % відносно енергокомплексів, які працюють на LNG; на 5–15 % для суден Ro-рах в залежності від особливостей судна, схемних рішень та характеристик енергетичної установки, компонентного складу палива, характеристик термохімічної обробки та робочих процесів теплових двигунів.

3. Вперше обґрунтовано ефективність термохімічної обробки палива при параметрах процесів, які відповідають параметрам робочих процесів енергетичних установок, при цьому встановлено, що утилізація вторинних

енергоресурсів газотурбінних суднових енергетичних установок шляхом термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив забезпечує збільшення ККД установки до 4 % відносно контактних газо-паротурбінних установок при умові, що при термохімічній обробці допустиме масове співвідношення витрат пара/паливо складає 6–7 для вуглеводневих палив та 0,6–0,9 для спиртових палив.

4. Вперше доведено, що поліпшення паливної економічності комбінованої дизель-газотурбінної енергетичної установки до 4 структурних % забезпечується термохімічною обробкою палива шляхом утилізації теплоти відпрацьованих газів газотурбінного двигуна за умови проведення термохімічної обробки окремо для ГТД при високому тиску (відповідно до тиску підведення палива до ГТД 1,0–2,5 МПа) та окремо для ДВЗ при низькому тиску (0,6–0,7 МПа) з подальшим сумісним використанням продуктів обробки в якості палива в газотурбінному та дизельному(их) двигуні(ах).

5. Вперше визначено, що на відміну від існуючих підходів до організації ефективного спалювання синтез-газу в камерах згоряння ГТД, використання термохімічної утилізації теплоти відхідних газів дає змогу отримувати продукти термохімічної обробки стійкого складу незалежно від вмісту метану у базовому паливі та забезпечує стабільність процесу горіння в низькоемісійній газотурбінній камері згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива з повітрям.

6. Отримав подальший розвиток метод тривимірного моделювання процесів горіння вуглеводневих та спиртових палив, на базі якого створена континуальна модель робочих процесів в низькоемісійних камерах згоряння ГТД, працюючих на продуктах термохімічної конверсії, яка дозволяє виявити особливості аеродинамічної структури реагуючих потоків в умовах турбулентної взаємодії, а також здійснити вибір раціональних геометричних параметрів для забезпечення сучасних екологічних показників енергетичних установок високотехнологічних суден та об'єктів нафтогазовидобування.

7. Вдосконалено підхід до створення багатофакторних параметричних моделей суднових енергетичних установок, які враховують обмеження допустимих значень параметрів та дозволяють оцінити вплив схемних рішень і

параметрів процесів на показники ефективності енергетичних комплексів з утилізацією енергії скидної теплоти шляхом термохімічної обробки палива та термохімічним перетворенням енергії в металогідридних установках.

8. На основі об'єктно-орієнтованого підходу вдосконалено багаторівневу класифікацію схем енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування, яка відрізняється комплексним описом їх складу та головних характеристик, що надало можливість оцінювати доцільність використання традиційних та інноваційних технологій.

За результатами виконаних наукових досліджень розроблено концепцію підвищення ефективності суднових енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування шляхом термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив за рахунок підводу теплоти відпрацьованих газів газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних установок, а також використанням потенціалу вторинних енергоресурсів малообертових дизельних двигунів термохімічним перетворенням енергії в утилізаційних металогідридних установках.

На основі отриманих наукових результатів сформульовано **наукові положення**:

1. Підвищення ефективності термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування досягається узгодженням параметрів робочих процесів термохімічної обробки палива та теплових двигунів і забезпечує зростання ККД установок до 4 %.

2. Термохімічна обробка вуглеводневих та спиртових палив з низькоемісійним спалюванням отриманих газоподібних продуктів та утилізацією вторинних енергоресурсів газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних установок, а також використання енергії вторинної теплоти малообертових дизельних двигунів в утилізаційних металогідридних установках забезпечує зменшення викидів діоксиду вуглецю на одиницю транспортної роботи високотехнологічних суден.

3. Комплексне використання термохімічної обробки палива та організація низькоемісійного процесу горіння в газотурбінній камері згоряння з попереднім

частковим перемішуванням палива з повітрям забезпечують відповідність викидів основних токсичних компонентів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування сучасним європейським стандартам.

Достовірність результатів досліджень забезпечується застосуванням сучасних розрахункових методів і засобів, адекватністю прийнятих допущень математичної моделі й реальних процесів, які відтворювалися при експериментальних дослідженнях, задовільним узгодженням результатів розрахунків з даними інших авторів, логікою отриманих результатів, які не суперечать практиці проєктування сучасних суднових енергетичних установок.

Наукове значення роботи полягає в розширенні уявлень про фізико-хімічні процеси термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів, обробки палив та процесів горіння продуктів їх конверсії, що є науковим підґрунтям для реалізації концепції підвищення ефективності суднових енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

Практичне значення отриманих результатів.

Обґрунтування діапазону ефективного застосування перспективних вуглеводневих та спиртових палив та отримані регресійні залежності, які описують закономірності впливу параметрів робочих процесів теплових двигунів на компонентний склад та енергетичні характеристики продуктів термохімічної обробки, дозволило розробити алгоритми та методики розрахунку, створити прикладне програмне забезпечення, яке апробоване при виконанні проєктних проробок енергетичного обладнання. Схемні рішення та практичні рекомендації з використання систем термохімічної утилізації в складі газотурбінних та комбінованих установок надали можливість розробити концептуальні проєкти газозовів LNG, LPG, круїзних лайнерів, а також суден Ro-рах, що задовольняють перспективним вимогам ІМО з енергоефективності.

Результати впровадження роботи

Результати дисертаційного дослідження впроваджено при розробці проєкту енергетичного комплексу потужністю 10–15 МВт з термохімічною обробкою попутного нафтового газу для морської платформи (ДП «Дослідно-проєктний центр кораблебудування» державного концерну «Укроборонпром», м.

Миколаїв); при розробці концептуальних проектів газовозів LNG, LPG, круїзних лайнерів, суден Ro-рах з низькоемісійними енергетичними установками («Zaliv Ship Design», «Сі-Джоб Миколаїв» та ДП «ПКБ Чорноморсуднопроект», м. Миколаїв); в технічній документації з модернізації енергетичного обладнання та питань адаптування термохімічних технологій утилізації до існуючого енергетичного обладнання (Херсонська верф «Smart Meritime Group», м. Херсон; ТОВ «Енерготехнологія», Миколаївська обл.); при проведенні досліджень характеристик суднових гібридних енергетичних установок з використанням технології SOFC-GT («Jiangsu University of Science and Technology», КНР); при проведенні досліджень характеристик газотурбінних енергетичних установок морського виконання («Georgian Veritas» LTD, Грузія), а також в навчальному процесі при підготовці здобувачів вищої освіти ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт» в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), ступенів «Бакалавр» та «Магістр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського (м. Кременчук), ступенів «Бакалавр» та «Магістр» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика» в Вінницькому національному технічному університеті (м. Вінниця), ступенів «Бакалавр» та «Магістр» за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт» в Національному університеті «Одеська Морська Академія» (м. Одеса) та Одеському національному морському університеті (м. Одеса). Впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджується відповідними актами про використання результатів дослідження.

Відомості про апробацію результатів дисертації

Основні положення і результати досліджень обговорювалися на таких заходах: I–XI Міжнародних науково-технічних конференціях «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2010–2019); III–IX Міжнародних науково-технічних конференціях «Суднова енергетика: стан та проблеми» (Миколаїв, 2007 – 2019); II–VIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Муніципальна енергетика: проблеми, рішення» (Миколаїв, 2007–2019);

I–V Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (Миколаїв, 2010–2018); V–XII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні» (Миколаїв, 2010–2017); IV, V, VII, VIII, X, XI Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» (Херсон, 2013, 2014, 2016, 2017, 2019, 2020); VII, VIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (Херсон, 2015, 2016); XI, XII, XIII International scientific-technical conferences «Water transport problems» (Baki, 2016–2018); VII, VIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Казахстан – Холод» (Алмати, 2017, 2018); «First Polar Equipment Technology Innovation Forum» (Harbin, 2018); XIV–XVII, XXI, XXII, XXIV Міжнародних конгресах двигунобудівників (Харків–Рибаче–Коблево, 2009–2012, 2016, 2017, 2019).

Публікації. Основні положення та результати проведених досліджень відображено в 93 друкованих наукових працях, з них 25 основних публікацій, у тому числі 16 у наукових спеціалізованих виданнях, рекомендованих переліком ДАК МОН України (з них 9 без співавторів), 8 публікацій у іноземних фахових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science Core Collection (з них 1 без співавторів) та 1 монографія (у співавторстві); до додаткових публікацій належать 3 патенти на винахід, 13 публікацій у фахових виданнях (з них 3 без співавторів), 52 тези доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій (з них 27 без співавторів).

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел із 295 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг роботи становить 382 сторінки, у тому числі 146 рисунків і 44 таблиці.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ПРОБЛЕМАТИКИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Тенденції світового енергоспоживання

Енергетичні комплекси різноманітного призначення та конструктивного виконання є основою існуючої «машинної» цивілізації. Сподівання на те, що при зміні «індустріальної» економіки на «інформаційну» енергетичні витрати суспільства істотно знизяться не мають під собою ніяких підстав. Потреби людства в енергії для забезпечення найрізноманітніших потреб постійно зростають й будуть зростати (рис 1.1) [1–3]. Глобальне збільшення населення понукає світову економіку до зростання. Згідно до даних BP Energy Outlook [4] до 2035 року населення збільшиться до 8,7 мільярдів чоловік. Додатково 1,6 млрд. мешканців планети Земля буде потребуватиме енергії. У той же час понад 80 % зростання енергоспоживання стимулюється посиленням впливу на світову економіку зростаючого середнього класу в країнах з економікою, що розвивається [5]. Світове виробництво енергії буде зростати на 1,5 % щорічно в період з 2012 до 2035 рр.

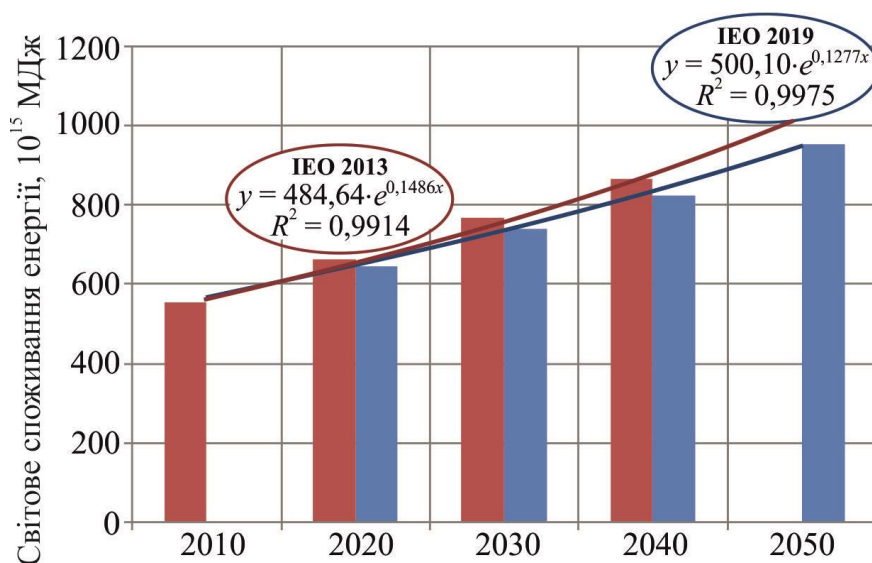


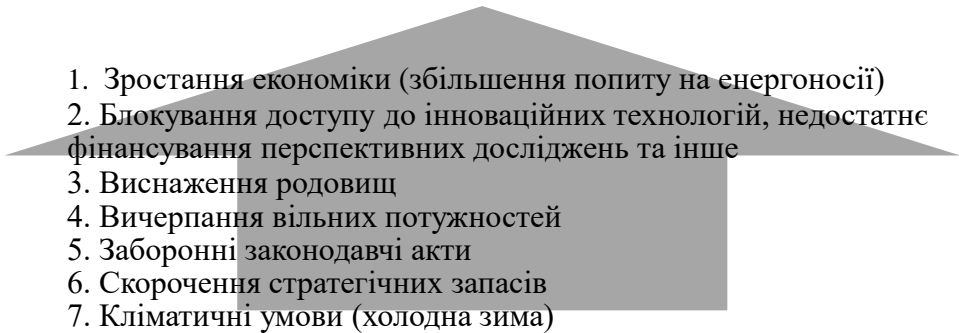
Рисунок 1.1 – Прогноз сумарного світового споживання енергії

На рис. 1.1 порівняно довгострокові прогнози 2013 р. та 2019 р., які були надані в щорічних аналітичних доповідях U.S. Energy Information Administration's (EIA) [1, 3]. EIA виконує свої дослідження за допомогою всесвітньої системи енергопрогнозування (WEPS+), інтегрована економічна модель якої фіксує довгострокові зв'язки між енергопостачанням, попитом та цінами в регіонах за різними допущеннями. Слід відмітити, що прогнози на енергетичному ринку є невизначеними, оскільки події, що формують майбутні зміни в галузі технологій, демографічні зміни, економічні тенденції та доступність ресурсів, є динамічними та багатовекторними. Прогнози не містять вплив деяких можливих майбутніх змін, наприклад, змін національних кордонів та міжнародних угод, руйнівні геополітичні або економічні події, появу проривних технологій, зміни в діючій політиці та інше. Наочною ілюстрацією цього є катастрофічне обрушення цін на нафту в першому кварталі 2020 року в зв'язку з впливом епідемії коронавірусу на світову економіку.

Підвищення якості життя пов'язано не тільки зі зростанням рівня споживання матеріальних благ і підвищенням питомих енергетичних витрат на одиницю населення, але і з забезпеченням якісних параметрів навколишнього середовища. Все це потребує розвитку нових технологій в галузі енергетики.

У сучасному світі ціни на вуглеводневі палива визначаються на біржах. На рівень цін впливають співвідношення попиту та пропозиції при врахуванні впливу інших факторів (політичних, фінансових, технологічних, стану запасів та інше). При цьому ціна транспортування викопних вуглеводневих палив може також впливати на ефективність енерговикористання внаслідок високої паливної складової загальних витрат. Споживачами викопного вуглеводневого палива є в тій чи іншій мірі всі країни світу. Географія видобутку теж досить широка – в «клуб» експортерів входить понад 100 країн.

В роботі [6] систематизовано чинники, що впливають на ціноутворення основного енергоресурсу – нафти, які можуть бути поширені і на інші викопні вуглеводневі палива (рис. 1.2).

- 
1. Зростання економіки (збільшення попиту на енергоносії)
 2. Блокування доступу до інноваційних технологій, недостатнє фінансування перспективних досліджень та інше
 3. Виснаження родовищ
 4. Вичерпання вільних потужностей
 5. Заборонні законодавчі акти
 6. Скорочення стратегічних запасів
 7. Кліматичні умови (холодна зима)

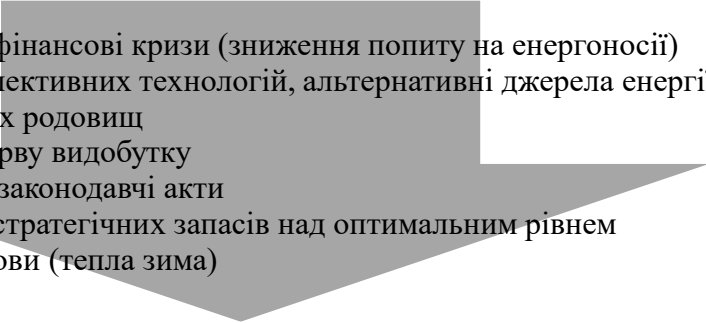
- 
1. Економічні та фінансові кризи (зниження попиту на енергоносії)
 2. Розвиток перспективних технологій, альтернативні джерела енергії
 3. Введення нових родовищ
 4. Наявність резерву видобутку
 5. Заохочувальні законодавчі акти
 6. Перевищення стратегічних запасів над оптимальним рівнем
 7. Кліматичні умови (тепла зима)

Рисунок 1.2 – Фактори, які впливають на ціноутворення викопних вуглеводневих палив (↑ – зростання, ↓ – зниження)

До кінця XX сторіччя найбільш доступні родовища нафти та газу на суші практично виробили свій ресурс. Акценти нафтогазовидобування неухильно зміщуються в бік запасів, прихованих товщею Світового океану. Понад 37 % обсягу світового видобутку нафти і 28 % видобутку газу припадатиме на поля, розташовані на шельфі [7]. Головним чином це родовища на Близькому Сході, в Бразилії, Мексиканській затоці, в Північному та Каспійському морях, на Арктичному шельфі. Нещодавно відкриті морські родовища нафти та газу приблизно в 10 разів перевищують нововідкриті наземні родовища. Освоєння родовищ континентального шельфу створює основу забезпечення світової економіки вуглеводневою сировиною на тривалу перспективу.

Незважаючи на високі капітальні та поточні витрати, частка глибоководного видобутку нафти та газу зростає (рис. 1.3) [8].

Для зниження залежності економіки від нестабільних та часто економічно необґрунтованих цін на викопне вуглеводневе паливо розвинені країни світу розвивають альтернативну енергетику, засновану на використанні поновлюваних джерел енергії [2].

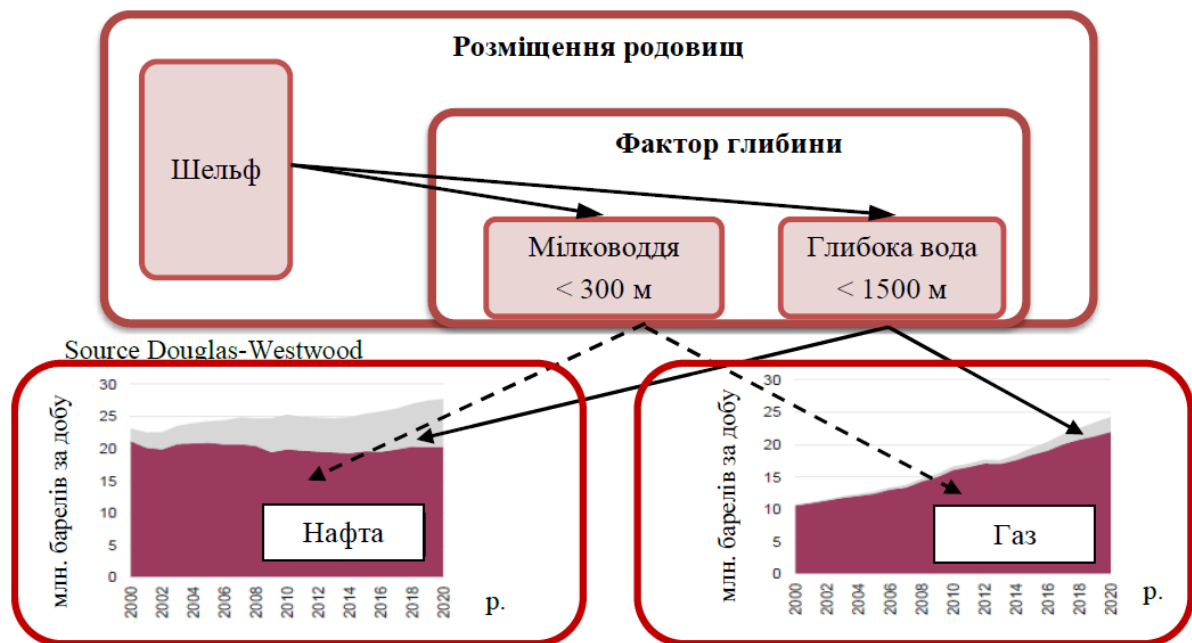


Рисунок 1.3 – Частки видобутку нафти та газу з родовищ континентального шельфу [8]

Активне впровадження технологій використання відновлюваних джерел енергії не компенсує попит на викопне вуглеводневе паливо. Так, частка такого вуглеводневого органічного палива як природний газ буде продовжувати зростати від 31 % у 2012 році до 34 % до 2035 року (рис. 1.4).

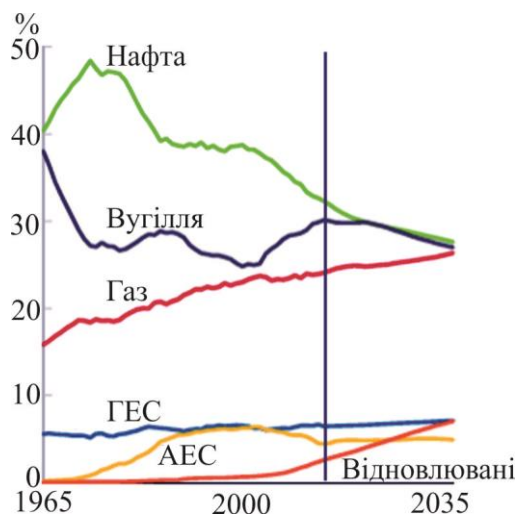


Рисунок 1.4 – Частки основних енергоносіїв

Як зазначено вище, основна частина енергії добувається з невідновлювального джерела – вуглеводневого органічного палива, видобуток якого все ускладнюється і, в свою чергу, вимагає росту енерговитрат.

Застосування альтернативних палив також збільшує вартість процесу виробництва енергії.

В таких умовах підвищення ефективності процесів перетворення енергії палива в енергетичних установках є важливим і актуальним завданням [9].

1.2 Аналіз сучасного стану світового флоту та морських об'єктів нафтогазовидобування

1.2.1 Визначення ознак високотехнологічних суден

Географія світової торгівлі підсилює вплив транспортної системи та її основного компоненту – транспортування вантажів морем на стан світової економіки. Згідно зі звітом United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) понад 70 % вартості світової торгівлі перевозиться на борту суден [10]. У 2017 році загальний обсяг перевезеного по воді вантажу склав 10,7 млрд. тонн. При цьому середньострокові прогнози розвитку морських перевезень припускають щорічне зростання на 3,8 % на період 2018–2023 рр. [11].

Світовий флот зростає як за дедвейтом, так і за кількістю суден. Станом на 1 січня 2018 р. кількість суден світового комерційного флоту складала близько 53 тисяч одиниць [12].

Дослідження характеристик об'єктів судноплавства з використанням ключових параметрів ефективності [13] показує, що різноманіття функціональних завдань, покладених на морські судна та об'єкти океанотехніки, формує необхідність спеціалізації суден (рис. 1.5).

Це, в свою чергу, вимагає врахування цільової функції судна, особливостей його експлуатації та інших факторів при визначенні пріоритетності впровадження перспективних технологій на етапі проектування.

Судна різного цільового призначення, для яких застосування перспективних технологій є визначальними для їх функціонування, являють собою високотехнологічні (technology-intensive) судна [11].



Рисунок 1.5 – Характеристики світового флоту на 01.01.2018 р.:
 1 – універсальні судна; 2 – балкери;
 3 – нафтові танкери; 4 – танкери-хімовози; 5 – контейнеровози;
 6 – пасажирські судна та Ро-Ро;
 7 – офшорні судна;
 8 – газовози; 9 – інші



Перспективні технології можуть бути як подальшим удосконаленням існуючих підходів, так і принципово новітніми рішеннями. Можливість застосування тієї чи іншої технології пов'язана з типом судна. Існує дві головні причини, які стримують глобальне застосування новітніх технічних рішень або розповсюдження вже існуючих на велику кількість типів суден. Це технічна сумісність та комерційна сумісність, які характеризують вплив технічних та фінансових обмежень на можливість застосування перспективних технологій.

Технології, які пов'язані з високими капітальними витратами, більше підходять для високоцінних активів (наприклад, офшорні судна, круїзні лайнери) [15]. При цьому мова йде про інвестиції в технології, які власники повинні повернути за рахунок вдосконалення заходів щодо підвищення ефективності, з метою покриття змінних і постійних витрат в процесі експлуатації.

Рівень комерційної вартості судна дозволяє опосередковано виявити комерційну сумісність застосування перспективних технологій [11]. Наприклад, вартість новозбудованих FPSO і бурових суден може перевищувати 800 млн. USD. При цьому витрати на розробку та впровадження нових технологій відіграють велику роль у вартості контракту. Пілотний проєкт, побудований на

абсолютно новий технології, може бути на 30 % дорожче ніж проєкт, в якому використовують вже апробовані рішення.

Аналіз частки вартості різних типів суден в загальній вартості комерційного флоту (прийнятої за 100 %) з урахуванням часток тоннажу і кількості суден даного типу дозволив виявити комерційну сумісність застосування перспективних технологій для низки типів суден (рис. 1.6).

Як видно з рис. 1.6, офшорні судна (включаючи FPSO, FSRU, MODU, OSV та інші), пасажирські судна (включаючи круїзні лайнери і пороми) і судна-газовози мають питому вартість на тонну дедвейту, яка більш ніж в 2,5 рази перевищує середнє значення та складає більш 1000 USD/т. Сумарна вартість таких суден становить близько 40 % вартості світового флоту, а дедвейт становить не більше 8 %.

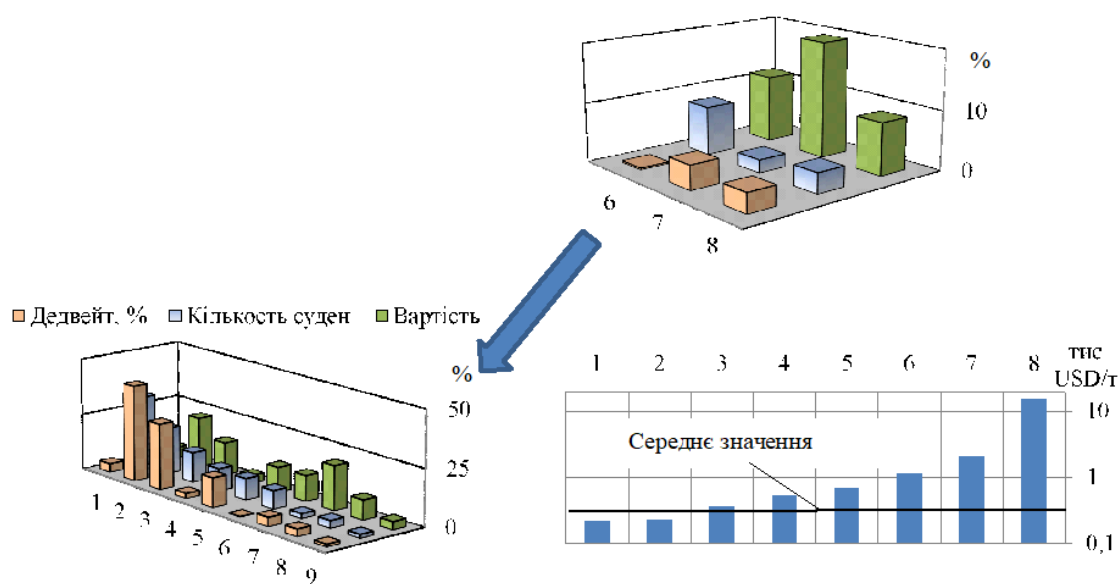


Рисунок 1.6 – Аналіз питомий вартості на тонну дедвейту різних типів суден: 1 – універсальні судна; 2 – балкери; 3 – нафтові танкери; 4 – танкери-хімовози; 5 – контейнеровози; 6 – пасажирські судна; 7 – офшорні судна; 8 – газовози; 9 – інші

Для офшорних суден, пасажирських суден та газовозів крім комерційної сумісності застосування перспективних технологій виявлено й технічну сумісність, бо вони відповідають зазначеним в [14, 15] типам суден, які мають

переваги в якості «випробувальних полігонів» для відпрацювання технологій підвищення енергоефективності: використання альтернативних видів палива; застосування дизель-електричних, комбінованих і гібридних установок; вдосконалення технологій утилізації вторинних енергоресурсів.

В дисертаційній роботі серед високотехнологічних суден розглядаються офшорні судна, пасажирські судна (включаючи круїзні лайнери і пороми Ro-рах), а також газовози LNG/LPG.

1.2.2 Тенденції розвитку морських об'єктів нафтогазовидобування та високотехнологічних суден

В даний час видобуток нафти та газу на шельфі морів та океанів є одним з основних джерел сировинної бази світової енергетики і має суттєвий вплив на економіку як окремих країн, так і цілих регіонів. Видобуток на мілководді освоєний вже давно і становить більш ніж 30 % обсягу світового видобутку нафти і 25 % видобутку газу. У глибоководних районах Світового океану є значні родовища нафти та газу, але їх освоєння вимагає великих фінансових інвестицій і впровадження нових технологій.

Для забезпечення роботи на шельфових родовищах створено великий і різноманітний флот офшорних суден. Офшорний флот містить такі основні групи суден і плавучих об'єктів [8]: обслуговуючі офшорні судна (Offshore Service Vessels – OSV), мобільні офшорні бурові об'єкти (Mobile Offshore Drilling Units – MODU), плавучі виробничі об'єкти та об'єкти зберігання і перевантаження (Floating Production Units and Storage Units) (рис. 1.7).

Глибоководні платформи і бурові судна можуть працювати на глибинах понад 3,5 км. Видобуток на великих глибинах обходиться дорого. Вартість новозбудованих бурових суден може досягати 900 млн. USD, а напівзаглибних платформ – 600 млн. USD.

Зростання видобутку в глибоководних і віддалених від наземної інфраструктури районах приводить до зростання числа суден FPSO, FLNG і FSRU. На кінець 2018 року в складі офшорного флоту діяло 183 судна FPSO (рис.

1.8), а також 31 судно FLNG і FSRU для обслуговування газових родовищ. За прогнозами до 2022 року буде побудовано ще 55 суден FPSO [15, 16].

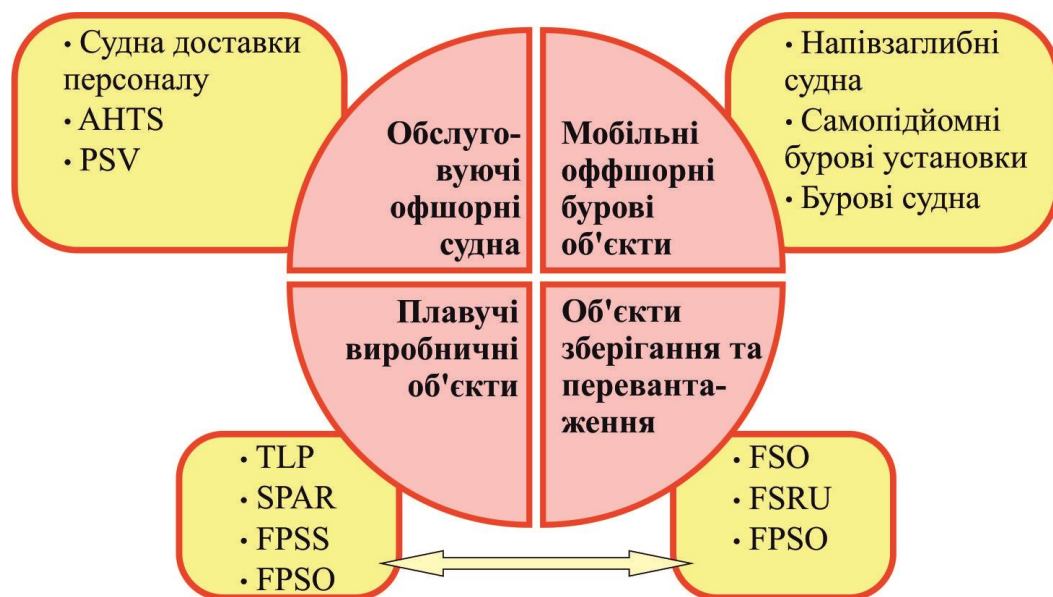


Рисунок 1.7 – Офшорні судна та плавучі споруди:

АНТС – Anchor Handling Tug Supply Vessel – буксир для встановлення та обробки якорів; PSV – Platform Supply Vessel – судно постачання морських платформ; TLP – Tension-Leg Platform - платформа з натяжним вертикальним якірним кріпленням; SPAR – Spar Platform – платформа типу SPAR; FPSS – Semi-submersible Floating Production System – напівзаглиблена плавуча виробнича система; FPSO – Floating Production Storage And Offloading System – плавуча система для видобутку, зберігання і відвантаження нафти; FSO – Floating Storage Offloading Unit – плавуча система для зберігання та відвантаження нафти; FSRU – Floating Storage And Regasification Unit - плавуча установка для зберігання та регазифікації

Одними з основних факторів, що забезпечують ефективну роботу першої ланки логістичного ланцюжка: видобуток – транспортування – поставка офшорних нафти і газу, є показники енергоефективності енергетичних установок офшорних суден і плавучих споруд нафтогазовидобування [7].

Найбільший інтерес для дослідження енергоефективності представляють установки MODU, FPSO, FLNG, FSRU. Виробничі системи на таких суднах визначають стабільність і ефективність процесів видобутку, а для FPSO – обробки і відвантаження (табл. 1.1).

Ці процеси вимагають великих витрат потужності. Протягом роботи FPSO на родовищі, потужність, яка необхідна для здійснення технологічних процесів,

змінюється в досить широких межах (рис. 1.9). Це призводить до необхідності забезпечення резерву потужності при проектуванні енергетичної установки FPSO.



Рисунок 1.8 – Загальний вигляд FPSO Pioneer Libra дедвейтом 130600 т [17]

Таблиця 1.1 – Основні параметри технологічних процесів для FPSO [18]

Параметр	Максимальне значення
Добовий видобуток газу, м ³ /доб.	4000000
Добовий видобуток нафти, м ³ /доб.	8000
Продуктивність обробки нафтоводяної суміші, м ³ /доб.	24000
Продуктивність обробки пластової води, м ³ /доб.	19000
Продуктивність нагнітання води в пласт, м ³ /доб.	28600
Тиск газу, кПа	55

За прогнозами IGU до 2035 року майже половина обсягу природного газу буде транспортуватися в зрідженому вигляді (LNG) суднами – газовозами, які іноді називають «плавучими трубопроводами». Має сенс проаналізувати причини такого зростання.

Для транспортування природного газу можливо застосування декількох технологій:

- 1) по трубопроводах;
- 2) у вигляді зрідженого природного газу (LNG – Liquid Natural Gas);
- 3) у вигляді стиснутого природного газу (CNG – Compressed Natural Gas);
- 4) у вигляді синтетичного рідкого палива (GTL – Gas To Liquids).

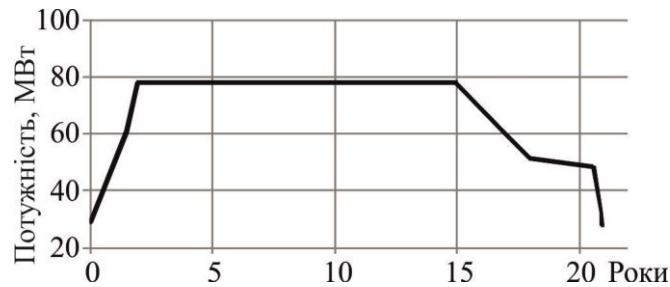


Рисунок 1.9 – Прогнозована потужність енергетичної установки FPSO типу Pioneiro de Libra за роки експлуатації на газовому родовищі узбережжя Бразилії [18]

В роботі [19] проведено порівняння різних технологій транспортування природного газу за продуктивністю і дальністю доставки (рис. 1.10).

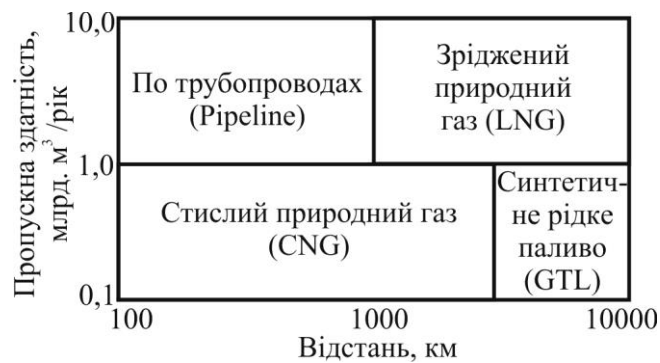


Рисунок 1.10 – Порівняння різних технологій транспортування природного газу

Оцінка ситуації, яка має місце на сьогоднішній час на ринку природного газу (обсяги та транспортні потоки), облік сучасної географії експортерів та імпортерів, аналіз технологічного рівня способів транспортування дозволяють виявити, що пріоритетними є технології транспортування по трубопроводах та в вигляді зрідженого природного газу. Цей висновок підтверджується прогнозами авторитетних експертів ринку енергоносіїв.

Трубопроводи залишатимуться основним засобом транспортування газу, (рис. 1.11), але частина, яка припадає на транспортування у вигляді LNG, збільшиться з 32 % в 2012 р. до 46 % в 2035 р.

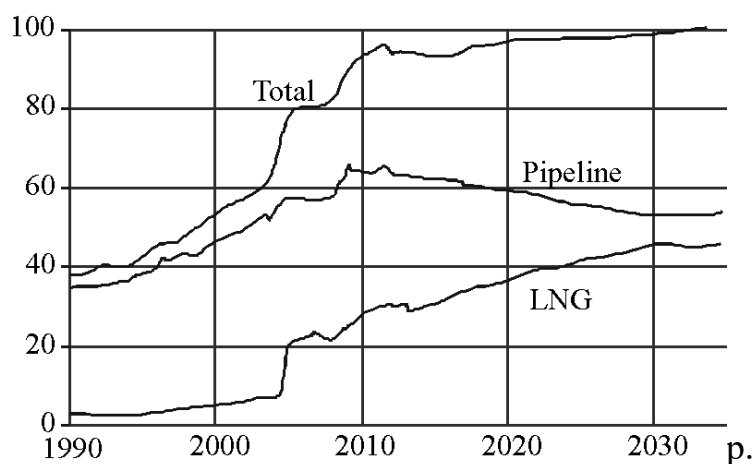


Рисунок 1.11 – Частки способів транспортування природного газу [20]

Світовий попит на LNG подвоївся за останні 10 років і становить понад 200 мільйонів тонн щорічно (табл. 1.2). У 2014 році обсяг перевезення LNG склав близько 243 мільйонів тонн (source: BG Group), а у 2018 – перевищив 316,5 мільйонів тонн (IGU World LNG Report – 2019 Edition).

Таблиця 1.2 – Зростання показників індустрії LNG за 20 років [21]

Характеристики	1993	2003	2013
Кількість заводів зі зрідження природного газу, од.	11	15	26
Кількість прийомних терміналів, од.	31	46	104
Кількість газозовів LNG, од.	76	152	393
Кількість країн-імпортерів, од.	9	13	29
Імпорт LNG млн. т	61,0	125,2	236,9

Згідно з даними World LNG Market Forecast 2016–2020 капітальні вкладення в ринок LNG складуть \$ 241 млрд. в період між 2016 і 2020 рр.

Заводи з виробництва LNG та вантажні термінали LNG розміщені на всіх континентах, окрім Антарктиди (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Географія розміщення заводів з виробництва LNG [22]

Географія перевезень LNG дуже широка (рис. 1.13). За даними на 2018 р. судна-газовози виконали 5119 рейсів. Найкоротший маршрут перевезення LNG морем становив 130 морських миль (Алжир – Іспанія), а найдовший – 15520 миль (Норвегія – Японія). Середня довжина маршруту – 7640 миль.

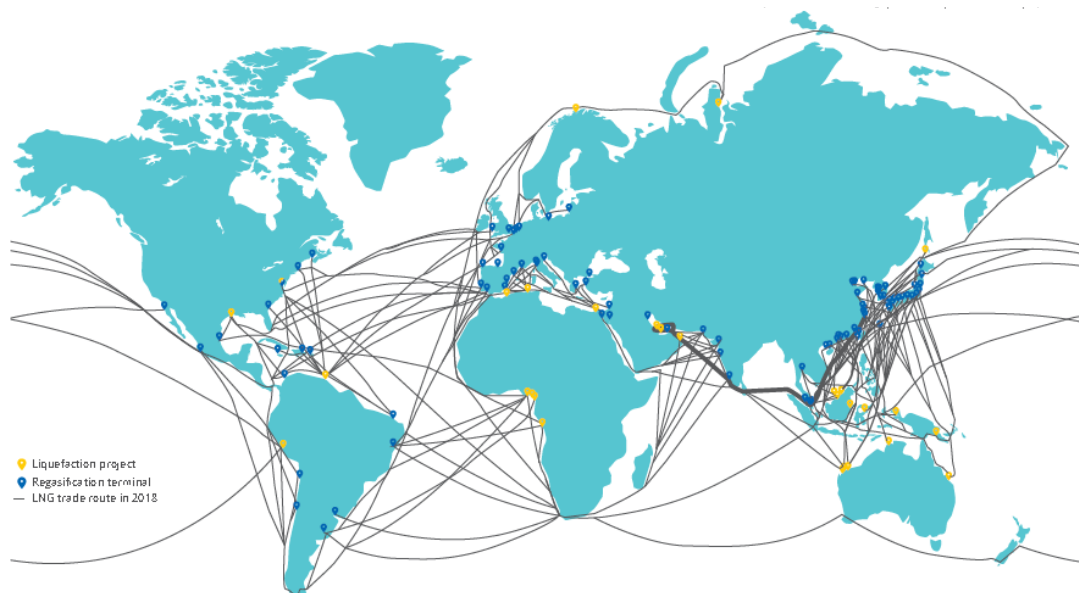


Рисунок 1.13 – Основні маршрути перевезення LNG морем [22]

Пік використання флоту LNG припав на 2012 рік, коли після катастрофічного цунамі та виведення з експлуатації ядерної енергетики Японії різко зріс попит на LNG. При цьому коефіцієнт використання газозовів LNG досягав 98% зі зростанням чартерних ставок до 150 тис. \$/доб. Слід зазначити,

що за даними IGU (International Gas Union) в 4 кварталі 2018 року зростання спотових чартерних ставок привело до історичного максимуму в 195 тис. \$/доб. Подальше деяке уповільнення темпів економічного зростання призвело до суттєвого зниження чартерних ставок і зниження коефіцієнта використання газовозів LNG нижче 90 %. Створення в портах Європи великих LNG терміналів імпорту газу, розвиток інноваційних технологій видобутку та розробки нових родовищ, а особливо зростання потенціалу терміналів LNG експорту в Австралії і США підтверджує оптимістичний прогноз на найближчі роки для кількісного і якісного зростання флоту LNG газовозів (рис. 1.14).

За даними IGU, на кінець 2018 року в експлуатації знаходилося 525 газовозів, включаючи 31 судно FSRU, призначене для зберігання і регазифікації. Згідно з прогнозом Westwood Global Energy Group в період 2018–2022 рр. очікується поставка ще 265 суден такого типу [23].

Також зростає попит і на інші вуглеводневі гази, такі як нафтовий газ, етилен, етан, хоча і не такими швидкими темпами як на природний газ.



Рисунок 1.14 – Динаміка зростання кількості газовозів LNG на період 2017-2021 рр. [24]

Істотно зріс попит на LPG в країнах Азії: за п'ятирічний період з 2012 по 2017 рр. експорт зрідженого нафтового газу з США збільшився на 39 % (рис. 1.15) [25].

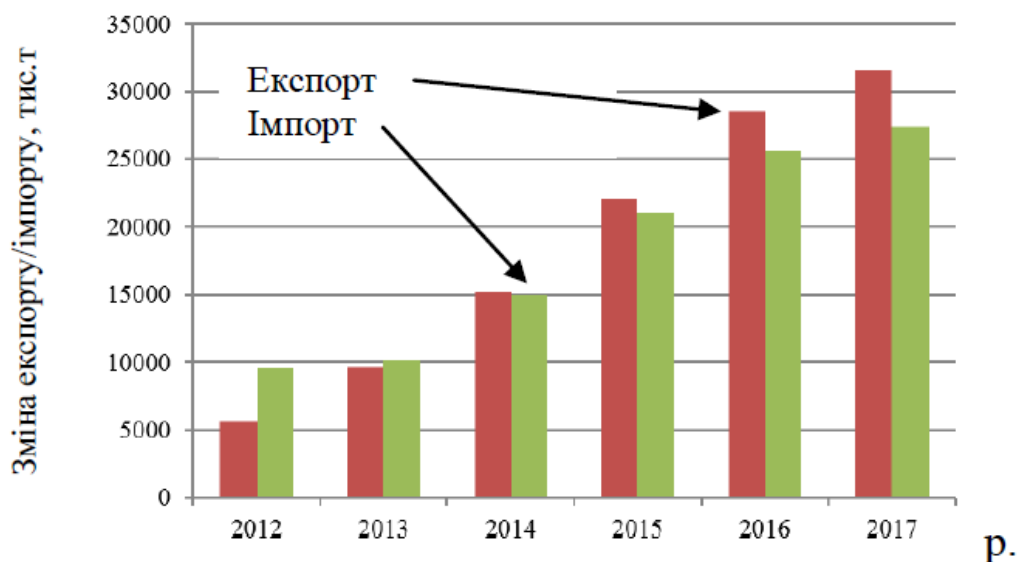


Рисунок 1.15 – Зміна рівня експорту та імпорту LPG в період з 2012 по 2017 рр.

Як наслідок, зростає попит на судна для транспортування нафтового газу споживачам, причому кількість LPG-газовозів, які знаходяться в експлуатації, не забезпечують цей попит (рис. 1.16) [25].

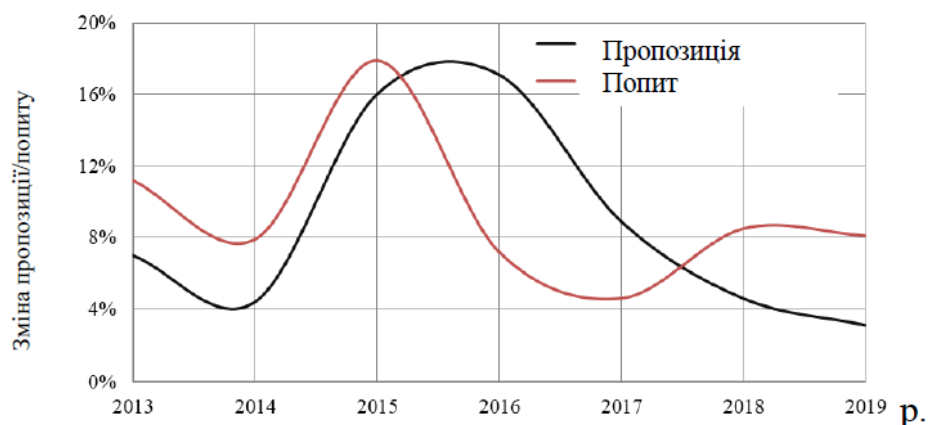


Рисунок 1.16 – Динаміка зміни пропозиції і попиту на LPG-газовози

Судна газовози виконуються за двома конструктивними схемами (рис. 1.17):

- 1) з автономними резервуарами, що являють собою міцну конструкцію з зовнішньою теплоізоляцією, типу Moss (сферичні) або типу SPB (призматичні);
- 2) з мембранними резервуарами, що являють собою мембрани з ізоляцією, які спираються на внутрішній борт, внутрішнє дно і внутрішню палубу типу GTT.

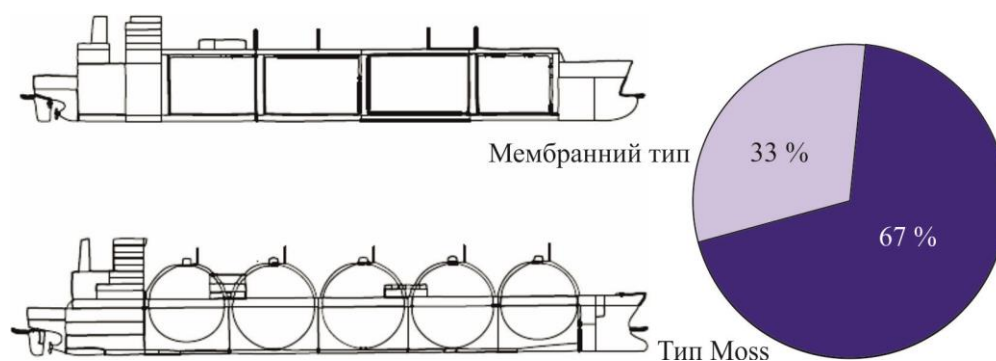


Рисунок 1.17 – Основні типи суден-газовозів [26]

Судна другого типу отримали на даний час найбільше поширення та складають 67 % світового флоту газовозів LNG [27]. Найбільш великими суднами є побудовані в період 2007–2010 рр. 31 судно класу Q-flex (210,0–217,0 тис. м³) і 14 суден класу Q-max (261,7–266,0 тис. м³). Для замовлень 2018 року середній розмір вантажомісткості газовозу склав 171,5 тис. м³.

Зростання флоту суден-газовозів дозволяє, з одного боку, задовольнити зростаючий попит на вуглеводневі гази в світі, а з іншого боку, призведе до збільшення екологічного навантаження на атмосферу, зокрема, до додаткових викидів парникових газів. Відмінною особливістю даного класу суден є те, що крім CO₂, який надходить в атмосферу з димовими газами суднової енергетичної установки, в повітря може потрапляти і вантаж, що випаровується. Таким чином, збільшується метанове скидання і, хоча ІМО поки не ввела обмеження на викиди метану, але відстежує його емісію з боку міжнародного флоту [28].

Попутний нафтовий газ (ПГ) є вуглеводневою сировиною поряд з нафтою і природним газом. Він може бути утилізований шляхом переробки на місці, закачуванням в пласт або використанням в якості палива на об'єктах офшорної інфраструктури. Компоненти попутного газу широко варіюються за складом та містять важкі вуглеводні [29–33]. Застосування такого палива в двигунах внутрішнього згоряння може викликати проблеми, пов'язані зі значним впливом складу палива на робочий процес двигуна. Провідні виробники суднових ДВЗ обмежують нижчу межу метанового числа (MN). Наприклад, для двопаливного двигунів Wartsila палива з метановим числом WMN < 46,8 не рекомендовані до використання, при цьому мольний вміст метану має бути не нижче 70 %, H₂ – не

більше 30 % [34].

Для підготовки попутного газу до використання в якості палива в ДВЗ Wartsila розробила *The GasReformer Technology*. За даною технологією метанове число паливного газу покращується за рахунок перетворення більш важких вуглеводнів в синтез-газ і метан [35]. У запатентованому *Wartsila GasReformer* передбачається процес конверсії попутного газу з паровим риформінгом на нікелевих каталізаторах ($\text{Ni} / \text{MgAl}_2\text{O}_4$). Так як нікелеві каталізатори дуже чутливі до сірчистих з'єднань, то передбачаються часті процедури сіркоочищення. Крім того, при експлуатації відбувається інтенсивна дезактивація нікелевого каталізатора внаслідок осадження вуглецю на поверхні каталізатора. Установка призначена для роботи з СОД Wartsila потужністю 4–12 МВт. Заявлений ККД установки становить 44,5 %.

Одним із рішень проблеми використання попутного газу є створення технологічних установок з переробки попутного газу в метанол, які дозволять вирішити екологічні проблеми та отримати альтернативне паливо і нафтохімічну сировину. В звітах ІМО та UNCTAD метанол та метанольно-спиртові суміші розглядаються як перспективні замітники традиційних суднових палив.

Норвезька фірма *Solco* створила проєкт спеціального судна для автономного виробництва метанолу у відкритому морі потужністю близько 1 млн. т/рік. Це комбінована плавуча система, яка призначена для одночасного видобутку попутного газу і виробництва метанолу [36]. Також розробкою плавучих установок з виробництва метанолу в морських умовах займалися фірми *Swedyard Development* та *Haldor Topsoe*.

Фірма *BHP Petroleum* на базі розробок *ICI* спроектувала та створила технологію отримання метанолу під низьким тиском [37]. Установка з отримання метанолу складається з трьох секцій: отримання синтез-газу, синтезу метанолу, очищення метанолу. До основних переваг морського комплексу перед береговим відносять: скорочення витрат на транспортування (танкерами) в порівнянні з трубопровідним та наземним транспортом, скорочення витрат на зберігання, можливість використання послідовно на декількох родовищах з урахуванням їх виснаження та малих витрат на передислокацію.

В роботі [38] запропонована оптимізована схема загального розташування виробничо-технологічного судна типу FPSO з трьома виробничими лініями і продуктивністю по метанолу і, відповідно, по газу – 1840 тис. т на рік. Південноафриканська компанія PetroWorld разом з трьома міжнародними компаніями ще в 2003 р. розробила великомасштабну плавучу систему для переробки на місці природного і попутного газів з віддалених родовищ в рідкий метанол потужністю близько 12000–15000 т/добу [39]. Для виробництва метанолу використовується газ з катарського Північного родовища. Отриманий метанол може застосовуватися в якості екологічного палива для електростанцій в тих районах, де інші види палива економічно або екологічно недоцільні. В 2007 р. такий завод був побудований на північному сході Катару, де вже була необхідна інфраструктура і морський порт. Плавуча метанольна установка, містить ємність для зберігання більше 250 тис. т метилового спирту. Установка створена за принципами проєктування традиційних FPSO.

Компанія Wison Engineering (WEL) спроектувала плавучий комплекс (рис. 1.18) з виробництва метанолу FGTM (floating natural gas to methanol) продуктивністю до 1,8 млн. т за рік. Об'єм накопичувальних ємностей судна складає 200000 м³[40].



Рисунок 1.18 – Судно FGTM [40]

Подібний підхід може вирішувати проблему раціонального використання попутних газів морських родовищ та свідчить про перспективність використання метанолу як енергоносія в судновій енергетиці майбутнього.

Розгляд тенденцій розвитку бізнесу морських круїзів вказує на значний вклад цієї галузі у світову економіку. Так кількість пасажирів круїзних лайнерів в останні роки складає більш 25 млн. осіб щорічно. Фінансовий вплив круїзної

галузі на світову економіку складає 126 млрд. доларів та забезпечує більш ніж 1 мільйон робочих місць із загальним фондом заробітної плати в 41 млрд. доларів. Книга замовлень круїзних суден на 2018–2025 роки містить 50 нових океанських суден інвестиційною вартістю 51 млрд. доларів [41]. Зростає і кількість суден Ro-рах, яка на кінець 2019 року складала 2900 одиниць. Експлуатація таких суден найчастіше здійснюється в зонах прибережного мореплавства, затоках, внутрішніх морях. У цих районах вимоги ІМО з енергоефективності контролюються дуже жорстко. Крім того в таких зонах діють і регіональні норми боротьби з забрудненням атмосфери. Таким чином, питання підвищення енергоефективності енергетичних установок суден такого типу є актуальним.

Узагальнені тенденції розвитку комерційного судноплавства [14] та локальні тенденції розвитку морських об'єктів нафтогазовидобування та високотехнологічних суден надано на рис. 1.19.



Рисунок 1.19 – Узагальнені тенденції розвитку комерційного судноплавства та локальні тенденції розвитку морських об'єктів нафтогазовидобування та високотехнологічних суден

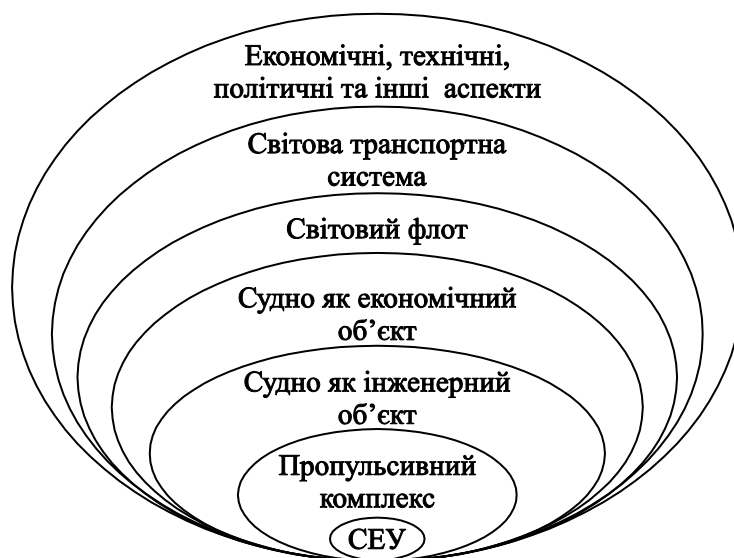
1.3 Постановка мети та задач досліджень

Міжнародні конвенції з обмеження забруднення навколишнього середовища з кожним роком стають дедалі жорсткішими, а необхідність економії

вуглеводневих енергоресурсів вимагає від виробників та розробників вдосконалення існуючого енергетичного обладнання або створення принципово нових технічних рішень.

Важливими показниками ефективності будь-якого транспортного судна є характеристики пропульсивного комплексу та головної суднової енергетичної установки (СЕУ), що є частиною багаторівневої ієрархічної структури судна [42]. Прийняття рішень при формуванні складу СЕУ та визначенні її характеристик проводиться з урахуванням технічних та економічних обмежень, що накладаються на проєктований об'єкт (рис. 1.20). У свою чергу, ці обмеження можуть бути пов'язані з сучасним рівнем розвитку техніки і технологій, а також з політичними, соціальними, зовнішньоекономічними та іншими аспектами.

Рисунок 1.20 – Суднова енергетична установка як частина багаторівневої ієрархічної структури [42]



Головні суднові енергетичні установки призначені для забезпечення виконання цільової функції судна або об'єкта океанотехніки. Для більшості суден потрібна механічна енергія для забезпечення руху при транспортуванні вантажу, але можливо вироблення механічної енергії для приводу електричних генераторів, компресорів технологічного обладнання офшорних суден та ін.

Вимоги законодавчих актів ІМО (International Maritime Organization) жорстко регламентують викиди шкідливих речовин від об'єктів судноплавства. Згідно з резолюціями ІМО для кожного нового судна валовою місткістю ≤ 400 т потрібно визначати необхідний (Required) та досяжний (Attained)

конструктивний індекс енергетичної ефективності судна EEDI (Energy Efficiency Design Index), а також операційний індекс EEOI (Energy Efficiency Operational Index) при проєктуванні, будівництві та експлуатації судна [43]. EEDI обчислюється в залежності від типу судна і дедвейту з урахуванням поправочного коефіцієнта, який поступово буде посилюватися аж до 2025 р. Attained EEDI обчислюється відповідно до методики ІМО і повинен бути \geq Required EEDI. Фізичний сенс індексів ідентичний і являє собою відношення маси виробленого енергетичною установкою судна парникового газу CO₂ до величини транспортної роботи судна, г CO₂/(т·миль):

$$\begin{aligned} \text{EEDI} &= \text{CO}_2\text{emission} / \text{Transport work} = \\ &= \text{Engine power} \times \text{SFC} \times C_F / (\text{DWT} \times \text{Speed}), \end{aligned} \quad (1.1)$$

де Engine power – експлуатаційна потужність двигунів, кВт; SFC – питома ефективна витрата палива двигунів, г/(кВт·год); C_F – безрозмірний кореляційний коефіцієнт, величина якого прямо залежить від вмісту вуглецю у паливі, т CO₂/т; DWT - для більшості транспортних суден приймається рівним дедвейту, т; Speed – швидкість судна, вуз.

Розрахунок EEDI виконується згідно методики, яка викладена в резолюції ІМО МЕРС.245(66) – 2014 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships, з урахуванням поправок, наданих в резолюціях МЕРС.263(68) і МЕРС.281(70) [44, 45]. Якщо на судні використовуються інноваційні технології, спрямовані на зниження витрати палива при отриманні електричної і механічної енергії, то їх вплив на індекс визначається згідно рекомендації МЕРС.1/Circ. 815 – 2013 [46].

Загальна формула для визначення індексу енергетичної ефективності для нових суден визначається як:

$$\begin{aligned}
EEDI = & \frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Capacity} \cdot V_{ref} \cdot f_w} + \\
& + \frac{\left(\left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Capacity} \cdot V_{ref} \cdot f_w} - \\
& - \frac{\left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Capacity} \cdot V_{ref} \cdot f_w}.
\end{aligned} \tag{1.2}$$

Розрахункова формула (1.2) містить потужності ($P_{ME(i)}$, P_{AE} , $P_{PTO(i)}$), питомі витрати палива ($SFC_{ME(i)}$, SFC_{AE}) для головної та допоміжної енергетичної установки, враховує режими навантаження енергетичного обладнання, можливість використання інноваційних технологій ($P_{eff(i)}$, $P_{AEff(i)}$, $f_{eff(i)}$), конструктивні особливості судна (f_j, f_c, f_l), метеорологічні параметри (f_w) та ін.

Для кожного типу суден, введені обмежувальні залежності на викиди CO_2 . Нормативні вимоги до емісії діоксиду вуглецю запроваджуються поетапно в період з 2013 по 2025 рр., посилюючись на кожному новому етапі.

З метою виявлення відповідності сучасних високотехнологічних суден перспективним вимогам ІМО щодо енергоефективності, були розглянути 30 проєктів суден, побудованих у 2013-2019 роках (рис. 1.21). Визначалися відхилення розрахункового індексу $EEDI_c$ від граничного значення індексу енергоефективності на третьому етапі введення $EEDI_{limit}$ (з 2025 року).

За результатами порівняння виявлено, що більшість проєктів не відповідають перспективним вимогам та виникає потреба втілення новітніх енергозберігаючих технологій в суднову енергетику.

Для більшості суден основна складова викидів CO_2 продукується двигуном або групою двигунів головної (пропульсивної для транспортного судна або технологічної для об'єктів нафтогазовидобування) установки.

Згідно інформації, яка наведена в [47], максимальна емісія CO₂ для транспортних суден припадає на ходовий режим, який забезпечує головна установка (рис. 1.22).

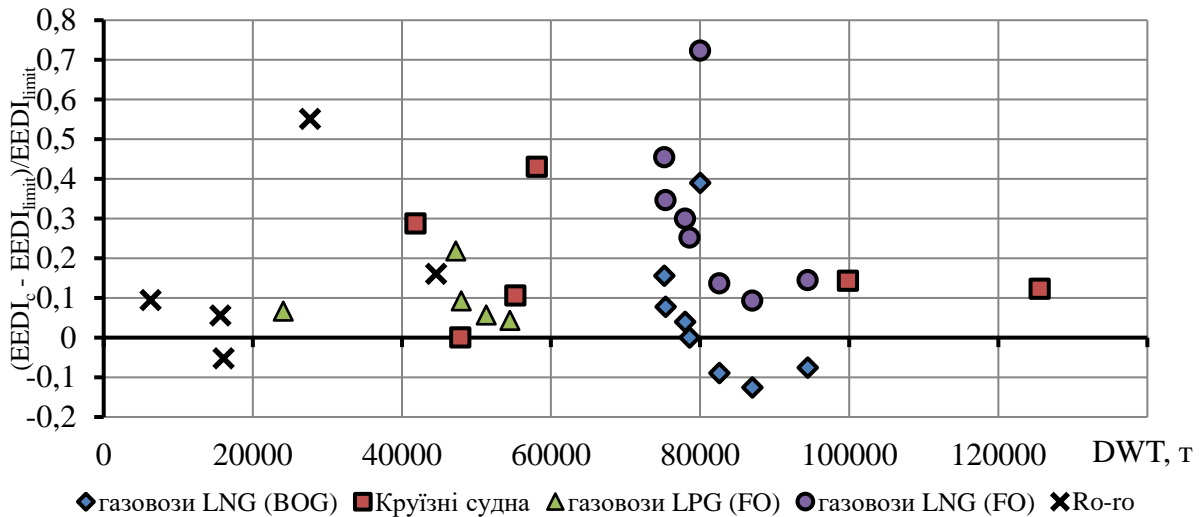


Рисунок 1.21 – Порівняння розрахункового індексу EEDI_c та граничного значення індексу енергоефективності на третьому етапі EEDI_{limit} для високотехнологічних суден, побудованих у 2013–2019 рр.

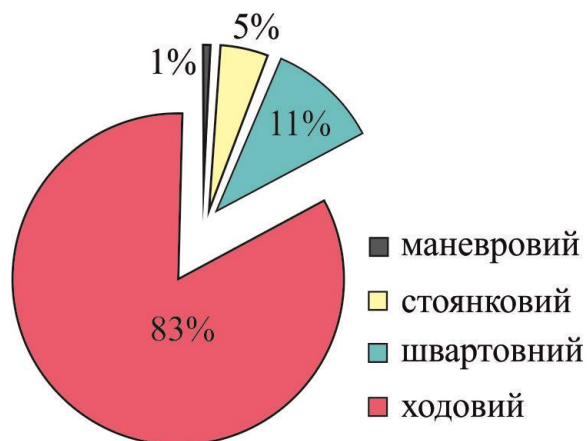


Рисунок 1.22 – Викиди CO₂ в залежності від режиму роботи енергетичної установки судна-газовоза

Як видно з аналізу формули (1.1), скорочення викидів CO₂ може бути досягнуто як зменшенням витрат палива ($\text{Engine power} \times \text{SFC}$), так і застосуванням палива з низьким вмістом вуглецю (враховується індексом C_F). В

умовах допущення, що потужність пропульсивної установки, дедейт і швидкість судна можуть бути прийняті постійними, на конструктивний індекс енергетичної ефективності судна EEDI впливають тільки питома витрата палива SFC і коефіцієнт вмісту вуглецю в паливі C_F

$$EEDI = K \times SFC \times C_F, \quad (1.3)$$

де $K = \text{Engine power} / (\text{DWT} \times \text{Speed})$, кВт/(т·миль).

Питома витрата палива обернено пропорційно залежить від нижчої теплотворної здатності палива LCV (*Lower calorific value*). Таким чином, при прийнятих допущеннях індекс EEDI є функцією від характеристик палива:

$$EEDI = f(C_F / LCV). \quad (1.4)$$

Вимоги ІМО безпосередньо пов'язані з підвищенням ефективності використання енергії палива в судновій енергетиці і застосуванням альтернативних палив. Таким чином, міжнародні норми емісії шкідливих компонентів потребують комплексного розв'язання питань удосконалення енергетичних комплексів. Це формує запит практики, спрямований на розробку та адаптацію енергоефективних технологій в суднову енергетику шляхом комплексного впровадження новітніх установок, визначення діапазонів їх досяжних параметрів з розробкою науково обґрунтованих перспективних схемних рішень, які забезпечують підвищення ефективності використання паливних ресурсів, мінімізацію викидів CO_2 та інших шкідливих речовин в навколишнє середовище.

Одним з перспективних напрямків підвищення ефективності та екологічності суднових енергетичних установок є утилізація вторинних енергоресурсів теплових двигунів. Термохімічні технології, які є технологіями утилізації вторинних енергоресурсів, дозволяють розширити сферу застосування альтернативних палив та забезпечують можливість ефективного енерговикористання різних типів теплових двигунів у складі енергокомплексів високотехнологічних суден, в першу чергу в складі єдиних установок з електрорухом.

До термохімічних технологій можуть бути віднесені технології

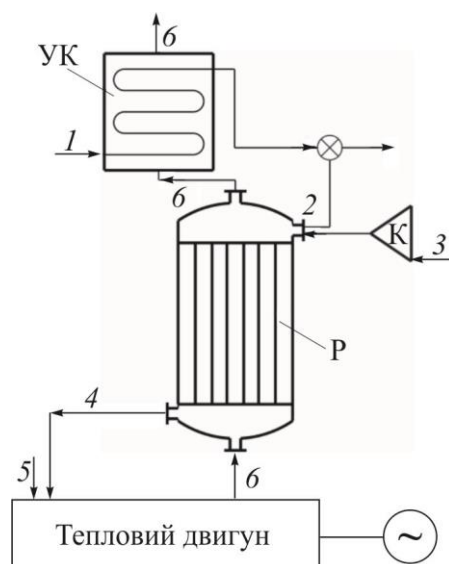
термохімічної обробки палив шляхом регенерації/рекуперації вторинних енергоресурсів теплових двигунів та технології перетворення енергії в металогідридних утилізаційних установках.

Термохімічна обробка вуглеводневого палива являє собою сукупність процесів, в результаті яких приріст ентальпії регенеруючого енергоносія (суміші вуглеводневого палива та окиснювача) протікає зі зміною його хімічного складу внаслідок ендотермічного процесу конверсії базового (вихідного) палива за рахунок регенерації/ утилізації вторинних енергоресурсів теплових двигунів.

На рис. 1.23 надано схему термохімічної обробки вуглеводневого базового палива шляхом парової конверсії за рахунок регенерації/ утилізації теплоти відпрацьованих газів теплового двигуна [48, 49].

Рисунок – 1.23 Принципова схема термохімічної обробки вуглеводневого базового палива шляхом парової конверсії за рахунок утилізації теплоти відпрацьованих газів теплового двигуна:

УК – утилізаційний котел;
К – компресор; Р – термохімічний реактор;
1 – вода; 2 – пара; 3 – вуглеводневе газоподібне паливо;
4 – продукти парового риформінгу (синтез-газ); 5 – повітря;
6 – відпрацьовані гази двигуна



Застосування металогідридних установок безперервної дії дозволяє використовувати низькопотенційну теплоту вторинних енергоресурсів теплових двигунів (рис. 1.24). Скидна теплота двигуна використовується для впливу на металогідридне з'єднання в реакторі-десорбері та на перегрів водню. Далі гідридоутворюючий матеріал переміщують в другій реактор - адсорбер. Водень направляють в водневу розширювальну машину для отримання корисної механічної потужності. Потім водень направляють в адсорбер, де, взаємодіючи з гідридоутворюючим матеріалом, він знову утворює металогідридне з'єднання.

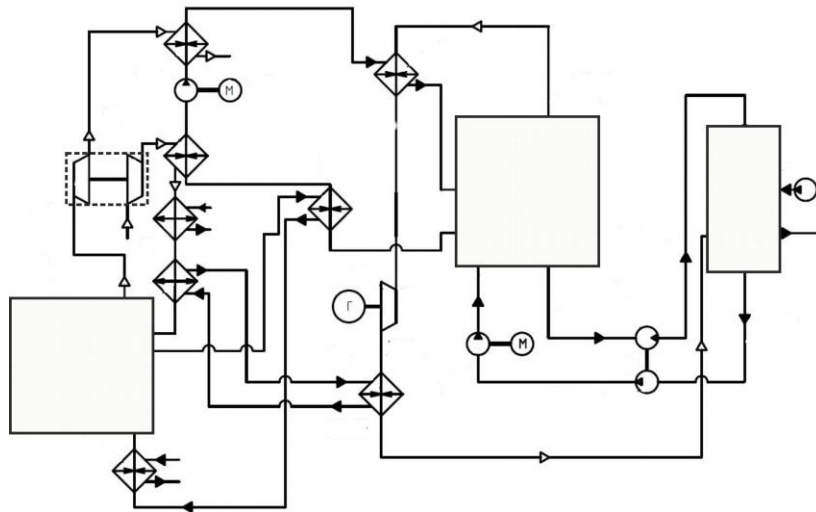


Рисунок – 1.24 Спрощена схема утилізаційної металогідридної установки пропульсивного малообертового двигуна судна-газовозу [50]

Концепція застосування термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів суднових теплових двигунів відповідає основним тенденціям розвитку суднових енергетичних установок, наведеним в аналітичному огляді Global Marine Technology Trends 2030, підготовленому Lloyd's Register [51]. Згідно з цим прогнозом перспективними напрямками на найближчі 15 років будуть:

- 1) використання альтернативних видів палива;
- 2) застосування дизель-електричних, комбінованих і гібридних установок;
- 3) вдосконалення технологій утилізації вторинних енергоресурсів.

Будучи технологіями утилізації вторинних енергоресурсів, термохімічні технології дозволяють розширити сферу застосування альтернативних видів палива та забезпечують можливість використання різних типів теплових двигунів у складі єдиних електрогенеруючих установок.

Щодо першого напрямку, то термохімічні технології передбачають конверсію базового палива з використанням теплової енергії відпрацьованих газів. В якості базового енергоносія можуть використовуватися такі альтернативні палива як етанол/біоетанол, метанол, природний газ, нафтовий попутний газ різного складу, газоподібне паливо на основі важких вуглеводнів (етан, пропан, бутан та інші).

Другий напрямок відповідає тенденції застосування термохімічної

утилізації в комбінованих дизель-газотурбінних електрогенеруючих установках. В таких установках передбачається термохімічна утилізація теплоти відхідних газів ГТД шляхом парової конверсії вуглеводневого палива. Продукти конверсії використовуються в якості палива.

Дослідження термохімічних технологій обробки палива виконуються в світі на протязі десятиріч, але комплексні дослідження ефективності енергетичних установок морського виконання на базі утилізаційних термохімічних технологій практично відсутні. Розглядом різних аспектів проблеми підвищення ефективності енергетичних установок, в тому числі і за рахунок термохімічної регенерації відпрацьованих газів теплових двигунів, займаються різні наукові, проєктні та виробничі організації: Wartsila (Фінляндія), Gas Technology Institute (США), Technion – Israel Institute of Technology (Ізраїль), Harbin Engineering University (КНР), Samara State Technical University (РФ) та ін.

В подібних проєктах задіяні також наукові організації України [52–54]. Так, в Інституті технічної теплофізики НАН України під керівництвом проф. В.Г. Носача досліджувались теоретичні питання створення технологій термохімічної регенерації скидної теплоти технологічного обладнання. Наукові дослідження, пов'язані зі встановленням закономірностей термохімічних процесів енергоперетворення, а також розробкою та впровадженням термохімічних технологій виконуються в Машинобудівному навчально-науковому інституті Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Незважаючи на велику кількість наукових досліджень в галузі термохімічної утилізації (серед них роботи В. Г. Носача, А. А. Шрайбера, В. Ф. Каменева, Н. Л. Хрипача, J. M. Protopas, D. I. Pashchenko, A. Poran, L. Tartakovsky та інших), методологічні і технічні аспекти вирішення проблеми створення технологій термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів теплових двигунів суднових енергетичних установок до теперішнього часу розроблено не в повній мірі [55,56]. Деякі наукові дослідження присвячено вирішенню проблем ефективного спалювання синтез-газу в камерах згоряння газотурбінних двигунів експериментальними методами, і тільки в незначній

кількості публікацій вчені використовують сучасні методи обчислювальної гідродинаміки, що дає змогу значно прискорити впровадження елементів технологічної системи в практику створення суднових енергетичних установок. Комплексні дослідження у цьому напрямку в Україні практично відсутні.

Недостатньо уваги в теперішній час приділено дослідженню ефективності схемних рішень газотурбінних та комбінованих енергетичних установок суден та морських об'єктів нафтогазовидобування на базі енергетичних модулів, які застосовують термохімічні технології. Відсутні дослідження впливу використання металогідридних утилізаційних установок на енергоефективність суднових пропульсивних комплексів.

Оцінка стану досліджень процесів термохімічних перетворень енергії та аналіз сучасних тенденцій в галузі суднової енергетики виявила необхідність вирішення **науково-прикладної проблеми** підвищення ефективності використання паливних ресурсів та зменшення викидів токсичних компонентів шляхом раціональної організації перетворень енергії в термохімічних системах утилізації теплоти вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

Відповідно до запиту практики сформульована **мета дослідження** - підвищення ефективності енергетичних установок з термохімічними системами утилізації теплоти вторинних енергоресурсів для високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних **задач дослідження**:

1. Аналіз тенденцій світового енергоспоживання та оцінка перспективності застосування термохімічних систем утилізації теплоти вторинних енергоресурсів в суднової енергетиці на базі узагальнення та систематизації масиву значень, які описують енергетичні установки високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

2. Виявлення шляхом математичного і фізичного моделювання діапазону ефективного застосування перспективних палив при їх термохімічній обробки

шляхом утилізації вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

3. Виявлення закономірностей взаємного впливу характеристик термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив та параметрів робочих процесів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

4. Розробка науково обґрунтованих нових схемних рішень газотурбінних і комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних установок з термохімічними системами утилізації теплоти вторинних енергоресурсів та дослідження впливу їх параметрів на енергоефективність.

5. Визначення умов ефективного спалювання продуктів термохімічної обробки палива в газотурбінних камерах згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива з повітрям.

6. Теоретичні дослідження процесів спалювання продуктів термохімічної обробки палива в газотурбінній камері згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива та окиснювача.

7. Визначення параметрів ефективного перетворення енергії в металогідридних утилізаційних установках сучасних та перспективних суден-газовозів.

8. Апробація положень концепції підвищення ефективності енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування та впровадження результатів наукових досліджень.

Висновки за першим розділом

1. Тенденції світового енергоспоживання та необхідність виконання вимог законодавчих актів щодо зниження впливу суднової енергетики на навколишнє середовище вимагають вирішення проблеми підвищення ефективності процесів перетворення енергії палива в енергетичних установках різного функціонального призначення.

2. Аналіз характеристик енергетичних установок сучасних високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування виявив, що більшість існуючих СЕУ не відповідають перспективним вимогам ІМО з енергоефективності, що вимагає втілення в практику проєктування та експлуатації новітніх енергозберігаючих технологій.

3. Технологія підвищення енергоефективності енергетичних установок шляхом використання термохімічних систем утилізації вторинних енергоресурсів має найбільшу перспективу для енергоємних високотехнологічних суден та морських об'єктів нафтогазовидобування.

4. До теперішнього часу практично відсутні комплексні дослідження енергетичних установок морського виконання на базі утилізаційних термохімічних технологій, що потребує детального аналізу ефективності газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних установок на базі енергетичних комплексів з термохімічними системами.

5. Вирішення науково-прикладної проблеми підвищення ефективності використання паливних ресурсів та зменшення викидів токсичних компонентів шляхом раціональної організації перетворень енергії в термохімічних системах утилізації теплоти вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування вимагає обґрунтування перспективних для термохімічної обробки палив, дослідження процесів ефективного спалювання продуктів термохімічної обробки, розробки відповідних схемних рішень енергетичних установок, апробації та впровадження результатів наукового дослідження.

Основні наукові результати розділу опубліковано в [57–63].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Загальна методологія дисертаційного дослідження

Комплексне вирішення науково-прикладної проблеми підвищення ефективності використання паливних ресурсів та зменшення викидів токсичних компонентів шляхом раціональної організації перетворень енергії в термохімічних системах утилізації (ТХСУ) теплоти вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування вимагає розробки методології дослідження, яка ілюструється технологічною картою дослідження (рис. 2.1).

Робочою науковою гіпотезою дисертаційного дослідження є твердження, що підвищення ефективності використання енергії палива в енергетичних установках та зменшення викидів шкідливих речовин досягається паровою конверсією вуглеводневих та спиртових палив за рахунок утилізації теплоти вторинних енергоресурсів з подальшим низькоемісійним спалюванням отриманих продуктів в газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних установках, а також утилізацією енергії скидної теплоти судових малообертових дизельних двигунів термохімічним перетворенням енергії в металогідридних установках.

Для поліпшення ефективності процесів перетворень енергії при термохімічній обробці палив за рахунок підводу теплоти відпрацьованих газів пропонується використовувати **ідею** організації термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив шляхом парової конверсії при параметрах, які узгоджено з параметрами робочих процесів енергетичних установок і вторинних енергоресурсів, а також низькоемісійним спалюванням продуктів термохімічних реакцій в газотурбінних камерах згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива і окиснювача.

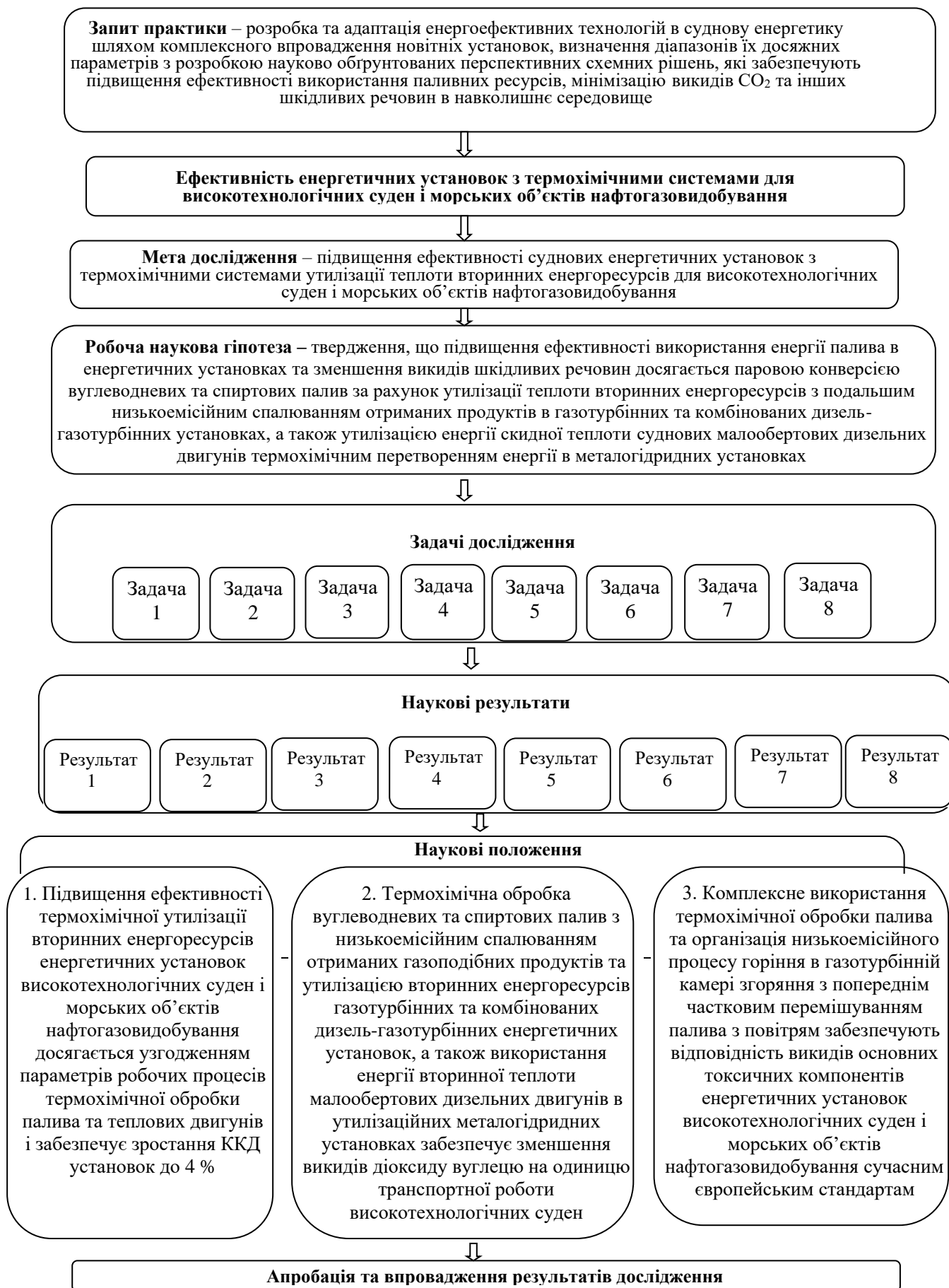


Рисунок 2.1 – Технологічна карта дослідження

Заплановані в дисертаційній роботі теоретичні та експериментальні дослідження дадуть змогу:

1. Визначити шляхи застосування термохімічних систем утилізації теплоти вторинних енергоресурсів в судновій енергетиці на базі комплексного опису складу та головних характеристик енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів.

2. Визначити діапазон ефективного застосування вуглеводневих та спиртових палив для термохімічної обробки шляхом утилізації вторинних енергоресурсів енергетичних установок.

3. Виявити закономірності впливу допустимих параметрів вторинних енергоресурсів теплових двигунів на доцільність термохімічної обробки перспективних палив

4. Обґрунтувати принципи організації термохімічної обробки палива за рахунок підводу теплоти відпрацьованих газів в умовах узгодження параметрів процесів термохімічної обробки палива з параметрами робочих процесів теплових двигунів.

5. Розробити нові схемні рішення та визначити показники ефективності суднових газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних установок з використанням термохімічної обробки палива.

6. Визначити раціональні параметри суднових енергетичних установок з використанням термохімічних систем утилізації теплоти вторинних енергоресурсів в металогідридних установках.

7. Створити математичну модель хімічно реагуючих потоків в камерах згоряння ГТД, що працюють на продуктах термохімічної конверсії палив різного складу, яка дозволяє коректно прогнозувати гідродинамічні і хімічні процеси.

8. Визначити умови організації робочого процесу та раціональні параметри низькоемісійних камер згоряння, що працюють на модифікованих продуктах термохімічної обробки палива.

Узагальнення отриманих результатів дозволить сформулювати нові наукові положення.

Наукове значення роботи буде стосуватися розширення уявлень про фізико-хімічні механізми термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів, обробки палива та процесів горіння продуктів конверсії, що є науковим підґрунтям для реалізації концепції підвищення ефективності суднових енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування, які відповідають світовому рівню за показниками економічності та екологічності.

Планується отримати нові практичні результати, які стосуються обґрунтування діапазону ефективного застосування перспективних палив, виявлення закономірностей впливу параметрів робочих процесів теплових двигунів на компонентний склад та енергетичні характеристики продуктів термохімічної обробки, що дозволить розробити алгоритми та методики розрахунку, створити прикладне програмне забезпечення для виконання проєктних проробок енергетичного обладнання. Схемні рішення та практичні рекомендації з використання систем термохімічної утилізації в складі газотурбінних та комбінованих установок дозволять розробити концептуальні проєкти високотехнологічних суден, які будуть задовольняти перспективним вимогам ІМО з енергоефективності.

2.2 Адаптація об'єктно-орієнтованих підходів до розв'язання задач дослідження суднових енергетичних установок з термохімічною утилізацією

2.2.1 Методологія теоретичних досліджень

Як вказано в розділі 1, суднова енергетична установка являє собою одну зі складових багаторівневої технічної системи, якою є судно в цілому. Вона може бути досліджена методами математичного моделювання, при цьому багатоваріантність схемних рішень вимагає виявлення взаємозв'язків елементів методами системного аналізу.

Аналіз наукових публікацій [42] показує, що в середині ХХ віку системний підхід стосовно складних технічних систем спирався на евристичну базу рішень

та так звану «гарну інженерну практику», що звужувало коло пошуку можливих варіантів. Надалі були сформульовані дві групи стратегій проектування та прийняття рішень – на базі декомпозиції та на базі оптимізації. Кожна з даних стратегій має свої обмеження. Декомпозиція дозволяє отримати детальні схемні рішення, але в недостатній мірі враховує взаємний вплив рішень, які належать до різних структурних рівнів. Стратегії, які засновані на оптимізації, успішно визначають раціональну конфігурацію складної технічної системи, але обмежені простором пошуку рішення і вибором ступеня наближення, які далеко не завжди можуть бути обрані коректно.

Оптимізаційні стратегії містять три основні етапи:

- виявлення набору альтернатив;
- створення математичної моделі;
- визначення оптимальної конфігурації шляхом реалізації в математичній моделі алгоритму оптимізації.

Результат зазвичай представляється у вигляді програми або програмного комплексу, в якому параметри фізичних об'єктів, логічні взаємозв'язки між ними, обмеження, що накладаються на об'єкти, замінюються алгебраїчним описом. Такий опис найчастіше являє собою рівняння цільової функції, а також систему рівностей та нерівностей математичного опису початкових та граничних умов, обмежень та вимог. Крім того математичний опис містить масив вихідних даних з інформацією про параметри об'єктів і робочих середовищ. Оптимізація зазвичай пов'язана з мінімізацією (максимізацією) цільової функції (наприклад, мінімізація питомої витрати палива, максимізація ефективного ККД).

Сформовані в кінці XX століття підходи до проектування засновані на використанні потужних можливостей обчислювального обладнання і програмних продуктів для дослідження нелінійних процесів в технічних об'єктах. Прогрес в теоретичних і практичних аспектах моделювання процесів також пов'язаний з появою об'єктно-орієнтованого моделювання. Це полегшує створення структурованої моделі та забезпечує систематичну основу для застосування широкого спектра проєктних альтернатив більш високого рівня.

Незважаючи на прогрес в цій області, проблеми створення коректних структурних моделей енергетичних комплексів залишаються як в теорії, так і на практиці. Так, опис основних процесів гідродинаміки в простих елементах структурних схем, наприклад в змішувачах або розподільниках потоку, носить нелінійний характер навіть без урахування термодинамічних перетворень та явищ тепломасопереносу. Врахування процесів хімічних перетворень значно ускладнює здійсненність алгоритмів оптимізації. Мова йде про можливість знаходження схеми, яка може бути практично реалізована, не кажучи вже про оптимальну. Найбільш гостро проблема створення коректної математичної моделі стоїть на етапі концептуального проектування в умовах невизначеності, коли параметри процесу недостатньо відомі.

Визначення набору альтернатив є першим кроком в заснованому на оптимізації підході до синтезу процесів. Рішенням проблеми може бути застосування теорії графів, як це реалізовано в роботі [64].

Сучасні об'єктно-орієнтовані підходи до вивчення складних технічних систем [65, 66] припускають поєднання двох стратегій системного підходу: декомпозиції та інкапсуляції (рис. 2.2).

Даний підхід може бути адаптований для дослідження процесів в об'єктах та комплексах складних технічних систем шляхом математичного моделювання.

Застосовуючи відомий із теорії складних технічних систем [65] принцип багаторівневої декомпозиції, розв'язання складної технічної задачі можливо замінити розв'язанням серії менших завдань. У кожному конкретному випадку може бути застосована одна з існуючих стратегій декомпозиції. При розгляді технічних систем найбільш зручною може бути функціональна декомпозиція. Вона передбачає, що основою для розбиття на функціональні підсистеми служить спільність функцій, які виконуються групами елементів. Одночасно для функціональної підсистеми може бути застосований принцип інкапсуляції, який передбачає розгляд підсистеми на рівні системи як «чорного ящика», що обмінюється з системою вхідними та вихідними фізичними та інформаційними потоками.

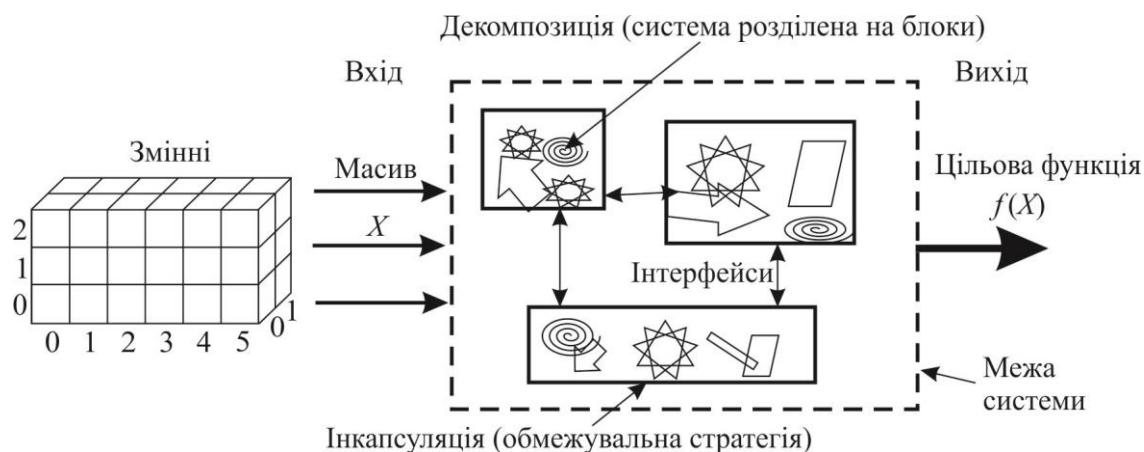


Рисунок 2.2 – Декомпозиція та інкапсуляція як стратегії проєктування складних технічних систем

При математичному моделюванні процесів в головних енергетичних установках суден та об'єктах нафтогазовидобування енергетична установка може розглядається як функціональна система, яка призначена для перетворення енергетичного потенціалу базового палива в механічну, теплову і електричну складові.

Застосування принципу інкапсуляції передбачає виділення енергокомплексу як функціональної сукупності об'єктів, об'єднаних призначенням (цільовою функцією) зі складу більш складної ієрархічної структури (судна або об'єкта нафтогазовидобування). Структура судна, в свою чергу формується сукупністю функціональних систем (наприклад, для FPSO – систем видобутку, виробництва, зберігання і відвантаження вуглеводнів, життєзабезпечення, енергетичної та ін.).

Взаємний вплив виділеного фрагмента та функціональних систем більш високого ієрархічного рангу (пропульсивний комплекс, судно тощо), а також зовнішніх функціональних систем того ж самого рівня (наприклад, технологічних систем для FPSO) замінюється масивами значень кількісних або якісних параметрів, а також узагальненим описом.

При створенні математичного опису процесів в складних технічних системах можливі три основні рівні деталізації: концептуальні агрегатні моделі, спрощені розрахункові моделі та докладні точні моделі. Запропонований в даній

роботі підхід передбачає модель енергетичної установки, в якій енергомодуль розглядається відокремлено від комплексу систем більш складної ієрархічної структури (судна або об'єкта нафтогазовидобування), елементом яких він є.

З точки зору фізико-хімічних процесів енергетична установка з термохімічною утилізацією вторинних енергоресурсів являє собою енерготехнологічний комплекс [67, 68]. Якщо всі процеси термохімічної утилізації (наприклад, обробки базового палива) у відповідному технологічному обладнанні спрямовані в кінцевому підсумку на зміну (поліпшення) характеристик конкретного теплового двигуна (групи двигунів), то цю сукупність двигунів (групи двигунів) і відповідного технологічного устаткування можна розглядати як енергетичний модуль.

Об'єктно-орієнтоване моделювання надає інтуїтивно зрозумілий спосіб моделювання складних технічних систем, в якому визначення змінних та опис обмежень для різних елементів структури укладені в відповідні класи об'єктів, організованих в ієрархію. Згідно з підходом, який сформований в роботі [69], доцільно для енергетичного модуля розглянути чотири ієрархічних рівня: модуль в цілому, підсистеми модуля, групи блоків обладнання підсистем, блоки обладнання, що входять до групи (рис. 2.3). Складні підсистеми можуть бути структурно розділені на частини, відповідно до функціонального призначення.

Таким чином, застосування принципів функціональної декомпозиції дозволяє уявити енергетичний модуль з термохімічними системами утилізації (ТХСУ) вторинних енергоресурсів у вигляді сукупності підсистем.

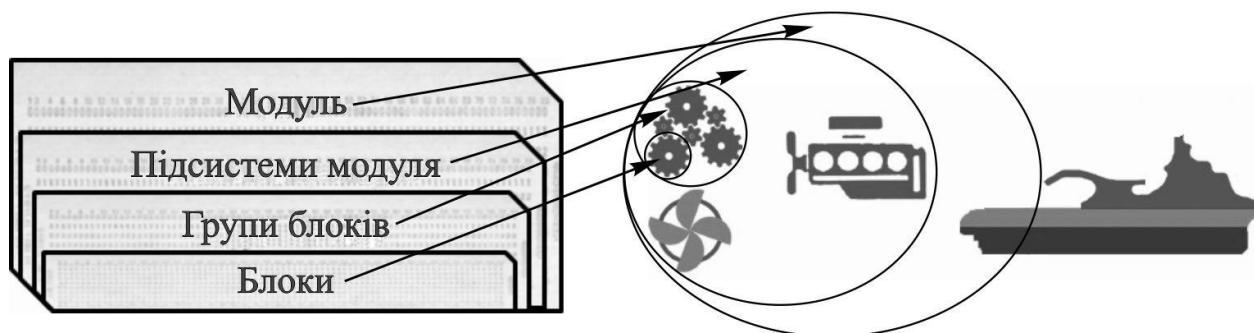


Рисунок 2.3 – Ієрархічні рівні структурної моделі енергетичного модулю

У свою чергу, кожна підсистема формується як сукупність k блоків (нагнітачі, реактори та ін.) та груп блоків, об'єднаних певною функціональною ознакою (газотурбінний двигун, ДВЗ, утилізаційний парогенератор, металогідридна утилізаційна установки та ін.).

Математичні моделі блоків та груп блоків, які утворюють математичну модель підсистеми, являють, зазвичай, систему нелінійних алгебраїчних рівнянь. Якщо попередні дослідження звузили область пошуку оптимальних рішень та добре узгоджені з робочим процесом, то можливо одночасне розв'язання всіх рівнянь (Equation Oriented, EO). Але такий метод не підходить для моделей, в яких відсутні точні оцінки всіх змінних, тобто концептуальних моделей.

В умовах концептуального проектування або дослідження перспектив втілення нових технологій доцільно використовувати модульний підхід (Sequential Modular, SM) [70]. Рівняння для кожного блоку (наприклад, насосу) розв'язуються за допомогою індивідуальних алгоритмів. В такому разі для всіх розрахункових модулів дотримується заздалегідь задана логічна послідовність обчислення. Переваги такого підходу до пошуку раціональних рішень є:

- можливість випробування алгоритмів обчислювання з подальшою верифікацією отриманих результатів окремо для деяких блоків або груп блоків;
- модульна структура дозволяє легко додавати нові блоки та модернізувати існуючі;
- відносна простота та прозорість рішень надає можливість легкої перевірки вихідних даних на відповідність та повноту.

Прикладом реалізації такого підходу є програмне забезпечення для моделювання фізико-хімічних процесів, яке реалізоване у програмному комплексі Aspen Plus [71]. Система базується на структурно-функціональних блоках, що моделюють одиничні ланки термодинамічного циклу або технологічного процесу. Основні блоки наступні: регулятори потоку, теплообмінники, пристрої зміни тиску, реактори (табл. 2.1).

Поєднання блоків зв'язками у вигляді матеріальних та енергетичних потоків надає можливість моделювання повної схеми процесу.

Таблиця. 2.1 – Структурно-функціональні блоки [71]

Загальна назва	Варіанти виконання	Призначення
Регулятори потоку	Змішувачі	Моделювання процесів змішування та розподілу потоків в клапанах та ін.
	Розподільники	
Тепло-обмінники	Нагрівачі	Моделювання процесів передачі теплоти, гідродинамічних процесів в теплообмінниках різного конструктивного виконання, визначення теплового і фазового стану вихідного потоку
	Охолодники	
Пристрої зміни тиску	Насос/гідравлічний мотор	Моделювання процесів зміни тиску відповідно до заданої потужності, тиску на виході, кривих продуктивності та ін.
	Компресор/турбіна	
	Клапан	Моделювання процесів зміни тиску та теплообміну в локальних гідравлічних опорах
	Труба	Моделювання процесів зміни тиску та теплообміну в трубопроводі
Реактори	На базі матеріального балансу	Моделювання процесів хімічних перетворень в різних умовах проведення реакцій
	На базі хімічної рівноваги	
	Кінетичні	

Моделювання фізико-хімічних процесів в блоках, групах блоків та в самих підсистемах спирається на фундаментальні закони збереження енергії та маси. Для математичного опису процесів фізико-хімічних перетворень використовуються рівняння матеріального та енергетичного балансу, які замикаються додатковими співвідношеннями, що враховують особливості конкретного процесу.

Математичне моделювання засновано на числових методах та виконується з певним ступенем достовірності, який враховується повною похибкою рішення.

Повна похибка рішення містить у собі багато складових, але найбільше впливають: похибки від невизначеності вихідної інформації; похибки, які пов'язані зі спрощеннями при постановці завдання дослідження; похибки залежностей, які використовуються при розрахунках; похибки методів розрахунку процесів, явищ, конструкцій; похибки розв'язання системи балансових рівнянь; похибки методу розв'язання задачі оптимізації; обчислювальні похибки.

Застосування сучасних розрахункових методів, реалізованих в спеціалізованих програмних продуктах, та практична відсутність обмежень по кількості ітерацій розрахункових циклів знівеливали більшу частину похибок (вони складають не більше 0,1 %, а в деяких випадках можуть не враховуватися). Найбільшу вагу мають похибки завдання вихідних даних та похибки, пов'язані з наявністю припущень, які спрощують модель в порівнянні з реальними процесами, що відбуваються в елементах енергетичної установки.

Підходи, які сформовані в роботах [72, 73], пропонують при математичному моделюванні процесів у обраному класі явищ (КЯ) визначати мінімальне значення розрахункової похибки, щоб підтвердити прийнятність обраної моделі. В якості універсального показника запропоновано використовувати порівняльну похибку [74, 75]

$$\varepsilon = \Delta u_{pmm}/S \leq [(z' - \beta')/N_{SI} + [(z'' - \beta'') / (z' - \beta')], \quad (2.1)$$

де Δu_{pmm} – безрозмірна абсолютна похибка моделі, яка пов'язана з кінцевим числом змінних; S – інтервал значень безрозмірної досліджуваної змінної: u ; z' – кількість фізичних розмірних змінних у обраному КЯ; β' – кількість первинних фізичних розмірних змінних у обраному КЯ; z'' – кількість фізичних розмірних змінних в обраній моделі; β'' – кількість первинних фізичних розмірних змінних в обраній моделі; N_{SI} – найбільша кількість безрозмірних комплексів.

При дослідженні процесів енергоперетворення в енергетичних установках з семи основних змінних системи SI (L – довжина, M – маса, T – час, I – сила току, Θ – температура, J – інтенсивність світла, F – кількість речовини)

використовуються лише три головних: L , M , Θ , а для нестационарних процесів – ще T . Процеси термохімічних перетворень потребують додаткового врахування F .

Розрахунок (див. Додаток А.1) показує, що досяжна мінімальна порівняльна похибка при моделюванні процесів енергоперетворення в енергетичних установках лежить в широкому діапазоні значень (табл. 2.2): від $(\varepsilon_{\min})_{LM\Theta} = 0,004756$ при стаціонарних процесах тепломасообміну ($KЯ \equiv LM\Theta$) до $(\varepsilon_{\min})_{LMT\Theta F} = 0,13307$ при моделюванні нестационарних процесів теплообміну з урахуванням термохімічних перетворень ($KЯ \equiv LMT\Theta F$).

Таблиця 2.2 – Досяжна мінімальна порівняльна похибка для різних КЯ

Клас явища	Опис явища	Мінімальна порівняльна похибка ε_{\min}
$LM\Theta$	Стаціонарний процес тепломасообміну	0,00476
$LM\Theta F$	Стаціонарний процес тепломасообміну з урахуванням термохімічних перетворень	0,01458
$LMT\Theta$	Нестационарний процес тепломасообміну	0,04457
$LMT\Theta F$	Нестационарний процес тепломасообміну з урахуванням термохімічних перетворень	0,13307

Таким чином, достовірність результатів теоретичних досліджень забезпечується застосуванням сучасних розрахункових методів і засобів, адекватністю прийнятих допущень математичної моделі й реальних процесів, логікою отриманих результатів, які не суперечать практиці проектування сучасних судових енергетичних установок.

2.2.2 Методологія експериментальних досліджень

Загальне завдання математичного і фізичного моделювання процесів термохімічної обробки палив полягає у виявленні закономірностей взаємного

впливу характеристик ТХО та параметрів робочих процесів енергетичних установок на ефективність перетворення енергії в досліджуваних системах.

Відповідно до задач дисертації сформульовано наступні завдання експериментальних досліджень ефективності процесів термохімічної обробки палива при тиску, який відповідає умовам підведення паливного газу до теплових двигунів:

- оцінка впливу витрат механічної енергії на ефективність термохімічної утилізації при організації процесів термохімічної обробки палива при підвищеному тиску;

- визначення компонентного складу синтез-газу, який отримано в результаті термохімічної обробки палива при підвищеному тиску, та перевірка адекватності запропонованої математичної моделі.

Для досліджень використовувалось експериментальне обладнання Центру перспективних енергетичних технологій науково-дослідного інституту «Енергетики та машинобудування» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (ЦПЕТ НДІ ЕМ НУК) [76], де на протязі ряду років проводився великий об'єм експериментів, спрямованих на визначення характеристик роботи теплових двигунів на альтернативних паливах [77–80].

Відповідно до плану експериментальних досліджень процесів, що протікають в системі термохімічної обробки палива, а також для визначення компонентного складу синтез-газу, який отримано в результаті конверсії, проведено модернізацію існуючого експериментального стенду. Модернізований стенд складається з підсистеми підготовки та подачі базової водоетанольної суміші, підсистеми термохімічної обробки суміші, підсистеми обробки синтез-газу, яка містить у собі блоки охолодження та конденсації продуктів конверсії, відведення конденсату, стискування та закачування синтез-газу в балони. До складу стенду входить підсистема вимірювань, яка дозволяє вимірювати витрати, тиск та температури всіх теплоносіїв, а також електричне навантаження на термохімічний реактор. Стенд дообладнаний блоком змішування базової водоетанольної суміші, блоком підвищення тиску в реакторі

та пристроєм вимірювання нижчої теплотворної здатності продуктів парової конверсії.

Схема експериментального стенду представлена на рис. 2.5, його загальний вигляд – на рис. 2.6.

До складу стенду входить наступне обладнання.

Дозуючі насоси Z1004-208-00 перистальтичного типу, з регулюванням витрати, призначені для дозування витрати етанолу та води (поз. 1 та 2 відповідно). Привід насосів від електродвигунів постійного току (12 В).

Загальний вигляд та характеристики дозуючого насосу:

- діапазон регулювання витрати від 0 до 1,67 мл/сек;
- температура робочого середовища від 0 до 40 °С;
- частота обертання ротору двигуна 83,3 об/с;

габаритні розміри: 0,065 м × 0,055 м × 0,035 м.



Механічний активатор (поз. 5), призначений для інтенсивного перемішування водоетанольної суміші, виконано за схемою асинхронного електродвигуна з «мокрим» ротором.

Загальний вигляд та характеристики механічного активатора:

- температура робочого середовища від 0 до 90 °С;
- максимальний робочий тиск 0,5 МПа;

габаритні розміри: 0,125 м × 0,050 м × 0,03 м.



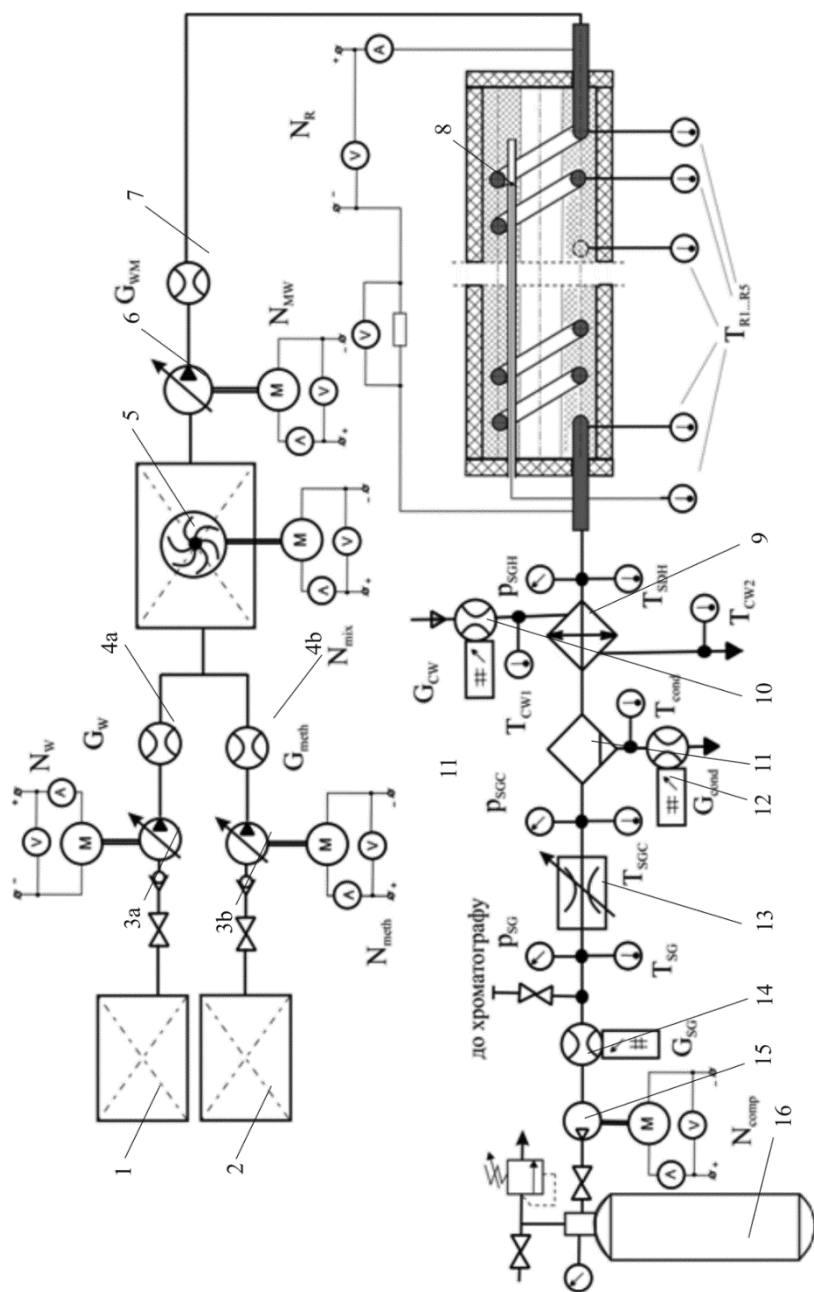


Рисунок – 2.5 Схема експериментального стенду:

1 – бак води, 2 – бак етанолу; 3a, 3b – дозуючі насоси води та етанолу відповідно; 4a, 4b – витратоміри води та етанолу відповідно; 5 – механічний активатор суміші; 6 – живильний насос; 7 – витратомір суміші; 8 – реактор термохімічної обробки суміші; 9 – охолоджувач синтез-газу; 10 – витратомір охолоджувальної води; 11 – конденсаторовідвідник; 12 – витратомір конденсату; 13 – дросельний клапан; 14 – витратомір синтез-газу; 15 – компресор; 16 – балон зберігання синтез-газу

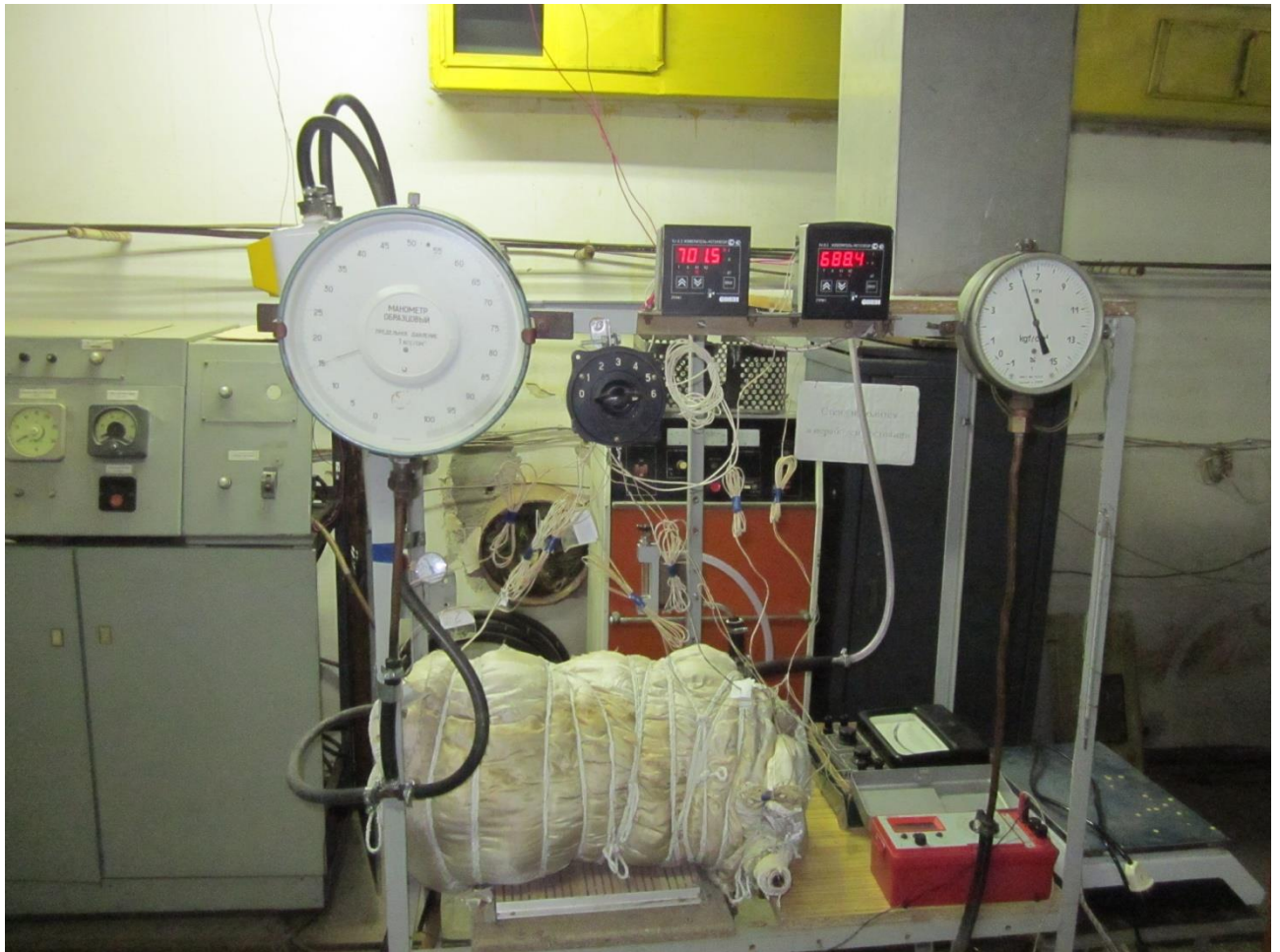


Рисунок 2.6 – Загальний вигляд експериментального стенду

Живильний насос DP 521 мембранного типу (поз. 6), з регулюванням витрати, призначений для живлення підсистеми термохімічної обробки водоетанольної суміші. Привід насосу від електродвигуна постійного струму (12 В).

Загальний вигляд та характеристики живильного насосу:

- діапазон регулювання витрати від 0 до 58,3 мл/с;
- температура робочого середовища від 0 до 55°C;
- максимальний робочий тиск 0,48 МПа;
- габаритні розміри: 0,125 м×0,070 м×0,060 м.



Забезпечення живлення електродвигунів постійного току для приводу

насосів здійснюється джерелами живлення ОВЕН БП60Б–Д4–12 напругою 12 В.

З метою встановлення залежності ККД насосу від режиму роботи експериментальним шляхом визначено витратно-напірну характеристику насосу. Витрата насосу визначалась ваговим способом, шляхом зважування мірної ємності з водоетанольною сумішшю до початку заміру і після його закінчення з фіксацією часу заміру. Зважування здійснювалося на електронних цифрових вагах ВТА-60 / 6-7-А 2.

Реактор термохімічної обробки суміші (поз. 8), виконано у вигляді спіральної трубки діаметром прохідного перерізу $7,8 \cdot 10^{-3}$ м (товщина стінки $6,0 \cdot 10^{-4}$ м, загальна довжина 6 м), яка розміщена в теплоізолючому корпусі (рис. 2.7).

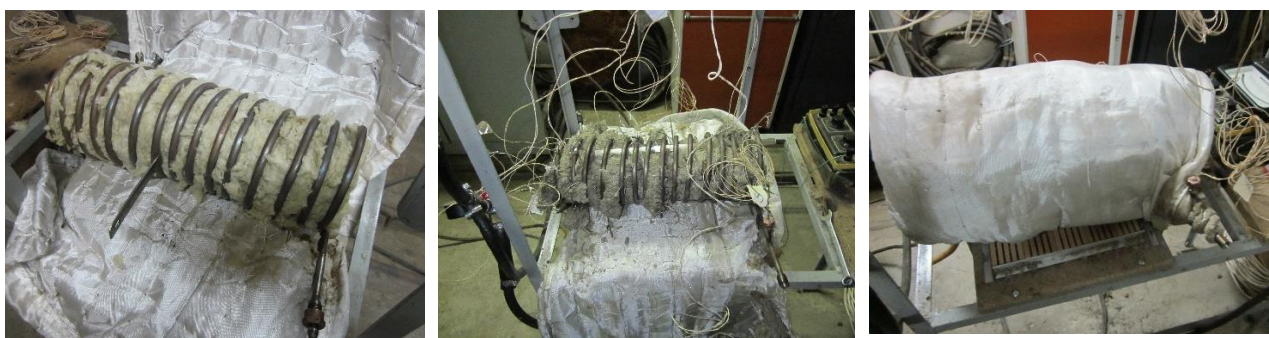


Рисунок 2.7 – Виготовлення та препарування реактору термохімічної обробки

Нагрів водоетанольної суміші в реакторі виконується шляхом пропуску через трубку постійного електричного струму від джерела живлення напругою 24–31 В.

Характеристики реактору термохімічної обробки суміші:

- діапазон витрати від 0 до 100 мл/с;
- температура робочого середовища від 0 до 700 °С;
- максимальний робочий тиск 0,5 МПа;
- габаритні розміри: 0,70 м × 0,50 м × 0,5 м;
- матеріал – нержавіюча сталь 12Х18Н10Т.

Препарування реактору виконано хромель-алюмелевими термопарами (ТХА) з термоелектродів діаметром 0,3 мм.

Охолодження отриманого в процесі парової конверсії синтез-газу та відвід конденсату здійснюється в охолоджувачі (поз. 9) та конденсатовідвіднику (поз. 11), які поєднані у загальному блоці. Блок виконано у вигляді теплообміннику трубчастого типу (діаметр прохідного перерізу $7,8 \cdot 10^{-3}$ м, товщина стінки $6,0 \cdot 10^{-4}$ м, загальна довжина 6 м). Охолоджувальне середовище – проточна вода.

Синтез-газ стискується за допомогою компресора 14 (CAJ 4492 A) та подається на зберігання в балони 15 ($V_6 = 50$ л). Стенд дозволяє експериментально визначити витрати потужності на стискування дегідрованого та охолодженого синтез-газу до тиску, який відповідає умовам підведення паливного газу до 4-х тактного ДВЗ (0,5-0,7 МПа).

Склад синтез-газу визначався методом газової хроматографії в Екологічній лабораторії НУК імені адмірала Макарова за допомогою хроматографа NeoCHROM Class B та з використанням програмного забезпечення UniChrom. Хроматограф проходив попереднє тарування за допомогою зразкових сумішей за ТУ-6-16-2956-87.

Характер вимірювань, необхідних для проведення експериментальних досліджень, передбачає ряд особливостей, що істотно впливають на вибір елементної бази системи вимірювання та реєстрації параметрів. До таких факторів можна віднести: необхідність контролю і фіксації величин різної фізичної природи, необхідність вимірювання квазістаціонарних і нестаціонарних величин, необхідність вимірювання характеристик як на стаціонарних, так і нестаціонарних режимах роботи устаткування, виявлення випадкової складової результатів багаторазовим дублюванням вимірювань.

При проведенні експериментальних досліджень всі вимірювання виконувались прямими та опосередкованими методами.

Єдність підходів до експериментальних досліджень та методології створення стендів і системи вимірювання, яка сформована в ЦПЕТ НДІ ЕМ НУК, дозволяє проаналізувати складові похибок прямих вимірювань параметрів експериментальних стендів з урахуванням їх індивідуального тарування в складі

підсистеми вимірювань параметрів.

Дані про прямі вимірювання фізичних величин, прибори, які були застосовані, та точність вимірювань наведені в табл. 2.4

Абсолютна похибка вимірювань визначалась з урахуванням метрологічних характеристик приборів та результату або діапазону вимірювальних параметрів.

Для підвищення точності проведених вимірювань використовувалась методика багатократних вимірювань, але в реальних умовах проведення експериментів зазвичай виконувалась обмежена кількість вимірювань.

Для оцінки точності результату у цих умовах визначалось наближене значення середнього квадратичного відхилення за формулою

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (2.2)$$

де x_i та \bar{x} – відповідно результат i -го вимірювання та середнього арифметичного значення величини; n – кількість вимірювань.

Оцінка середнього квадратичного відхилення середнього арифметичного значення \bar{x} визначалась за формулою

$$\bar{\sigma}(\bar{x}) = \frac{\sigma_y}{\sqrt{n}} = \mp \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}. \quad (2.3)$$

Для оцінки випадкової похибки визначалась не тільки її величина за даними формулами, але і ймовірність з якою вона приймає ці значення, тобто довірча ймовірність та довірча границя похибки вимірювання.

При обмеженій кількості вимірювань застосовувався розподіл Стюдента.

Величину довірчого інтервалу (похибку середнього арифметичного значення) визначали за формулою

$$\varepsilon(\bar{x}) = t_p \bar{\sigma}(\bar{x}) = \sigma_y \frac{t_p}{\sqrt{n}}, \quad (2.4)$$

де t_p – значення відносного інтервалу: для трикратних вимірювань $t_p = 1,23$ для довірчої ймовірності $P = 0,683$ та $t_p = 4,3$ для $P = 0,950$.

Результати вимірювань, які мають надмірні похибки, виключались з обробки як недостовірні. Для виявлення таких результатів використовуються методи перевірки статистичних гіпотез, зокрема застосовувався метод критерія 3σ (3-sigma rule).

Знаходження значних похибок опосередкованих вимірювань, зокрема теплового потоку, масових витрат газів та рідин та інше, визначалися видом їх функціональних залежностей від результатів прямих вимірювань типу $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

При нормальному розподілі похибок прямих вимірювань величин x_1, x_2, \dots, x_n похибка опосередкованого вимірювання оцінювалась середнім квадратичним відхиленням, яке обчислювалось за формулою

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_i^2}, \quad (2.5)$$

де $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ – частинна похідна функції; $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ – середні квадратичні відхилення результатів вимірювань величин x_1, x_2, \dots, x_n .

При визначенні теплового потоку:

- за рівнянням теплового потоку рідини (газу)

$$Q = G \bar{c}_p (t_{in} - t_{out}), \text{ Вт}; \quad (2.6)$$

- за рівнянням електричної потужності

$$Q = UI, \text{ Вт}. \quad (2.7)$$

Відносна випадкова похибка вимірювань складає відповідно:

$$\delta_Q = \frac{\sigma_Q}{Q} = \pm \sqrt{\delta_G^2 + \delta_{c_p}^2 + \left(\frac{\Delta t_{in}}{t_{in} - t_{out}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{out}}{t_{in} - t_{out}}\right)^2}; \quad (2.8)$$

$$\delta_Q = \pm \sqrt{\delta_U^2 + \delta_I^2}. \quad (2.9)$$

Значення відносних випадкових похибок вимірювань масової витрати $\delta_G = \frac{\sigma_G}{G}$, масової теплоємності $\delta_{c_p} = \frac{\Delta c_p}{c_p}$, вхідних та вихідних значень $\delta_{t_{in}} = \frac{\Delta t_{in}}{t_{in} - t_{out}}$, $\delta_{t_{out}} = \frac{\Delta t_{out}}{t_{in} - t_{out}}$, падіння напруги $\delta_U = \frac{\sigma_U}{U}$ та сили току $\delta_I = \frac{\sigma_I}{I}$ визначались за результатами оцінки точності прямих вимірювань, наведених в табл. 2.4.

Для виміру температур як первинні датчики використовувалися хромель-копелеві (ТХК) і хромель-алюмелеві (ТХА) термопари за ГОСТ 6616-74.

Таблиця 2.4 – Відомості про прямі вимірювання фізичних величин та прилади, які застосовано

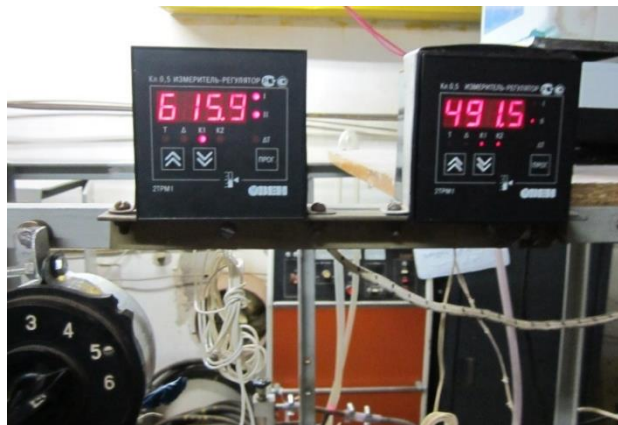
Середовище/параметр	Діапазон	Прилад	Абсолютна похибка
Температура, °С			
Атмосферне повітря	25 – 30	Термометр ТЛ-4	±0,1
Синтез-газ	550 – 700	Термопара хромель-алюмелева, вимірювач-регулятор ОВЕН УКТ 38 ТП	±7,0
Етанол, вода та водоетанольна суміш	25 – 30	Термопара хромель-капелева, вимірювач-регулятор ОВЕН УКТ 38 ТП	±0,5
Стінки теплообмінних апаратів	90 – 800	Термопара хромель-алюмелева, вимірювач-регулятор ОВЕН УКТ 38 ТП	±(1,0-7,0)
Охолоджувальна вода	25 – 35	Термопара хромель-капелева, вимірювач-регулятор ОВЕН УКТ 38 ТП	±0,5
Тиск, кПа			
Атмосферне повітря	100	Барометр-анероїд БАММ-1	±0,2
Синтез-газ	100 – 700	Перетворювач вимірювальний ОВЕН ПД100–ДІ0,6–111–0,5	±6,0
Етанол, вода та водоетанольна суміш	100 – 480	Перетворювач вимірювальний ОВЕН ПД100–ДІ0,6–111–0,5	±6,0
Перепад тиску	1 – 2	U–подібний манометр	±0,01
Об’ємна витрата, л/год			
Синтез-газ	0,5 – 1,2	Ротаметр РМ-А-0,0025ГУЗ	±0,1
Етанол, вода та водоетанольна суміш	0,2–1,7	Ротаметр РМ-А-0,0025ЖУЗ	±0,1
Охолоджувальна вода	5 – 50	Ротаметр РМ-А-0,063ЖУЗ	±1,0
Електричне обладнання			
Напруга, В	12 – 31	Універсальний вольтметр В7-38	±0,113
Сила струму, А	0-10		±0,22

Блок вимірювань складається з двох вимірювачів-регуляторів багатофункціональних ОВЕН УКТ 38 ТП (рис. 2.8), призначених для вимірювання температури. Згідно інструкції з експлуатації приріст основної зведеної похибки для вимірювача-регулятора ОВЕН УКТ 38 ТП складає ±0,5. В блоці вимірювань встановлено перетворювач інтерфейсу АС2, який застосовується для підключення до послідовного СОМ-порту комп’ютера.

Для перетворення надлишкового тиску застосовуються перетворювачі вимірювальні ОВЕН ПД100–ДІ0,6–111–0,5. Межа основної допустимої

похибки $\pm 1,0\%$. Додаткові похибки внаслідок відхилення температури оточуючого повітря від нормальних умов не більш $\pm 0,6\%$ / 10°C . Забезпечення живлення перетворювачів тиску здійснюється джерелами живлення ОВЕН БП60Б–Д4–36 напругою 36 В з силою струму 100 мА на один канал.

Рисунок 2.8 – Вимірювач-регулятор
багатофункціональний
ОВЕН УКТ 38 ТП



Виміри сили струму та напруги виконувалися за допомогою цифрового універсального вольтметра В7-38. Основна похибка при вимірюванні напруги постійного струму складає $\leq 0,04\%$ (рис. 2.9).

Рисунок 2.9 – Універсальний
вольтметр
В7-38



Виміри витрат рідин та газу виконувалися за допомогою ротаметрів типу РМ-А серії ГУЗ для синтез-газу та серії ЖУЗ для води, етанолу та водоетанольної суміші. Відносна похибка ротаметрів $\pm 4\%$.

Для визначення витрати потужності на стискування дегідрованого та охолодженого синтез-газу використовувався ватметр Д5016/2, який відповідає класу точності 0,2 за ГОСТ 8476-78.

Параметри навколишнього середовища визначалися таким чином: атмосферний тиск – за допомогою барометра-анероїда БАММ-1 з межами вимірювання 80–105 кПа і відносною похибкою $\pm 0,5\%$; відносна вологість

повітря – психрометром ПБО-1 з межами вимірювання 40 – 80 % і відносною похибкою ± 5 %.

Модернізація експериментального стенда зажадала доопрацювання підсистеми вимірювання і створення ефективних, швидкодіючих, але досить простих засобів вимірювання нижчої теплотворної здатності продуктів парової конверсії етанолу.

Проведений аналіз літературних джерел інформації [84] показав, що існуючі способи визначення теплотворної здатності горючих газів базуються на прямих і непрямих методах вимірювання. Способи, які базуються на прямих методах вимірювання, передбачають спалювання газу в калориметрі або засновані на реєстрації теплового потоку від міні-факелу. Вимірювання такими способами вимагають досить багато часу і характеризуються помірною точністю. Непрямі методи, засновані на функціональних зв'язках деяких параметрів, що характеризують вихідний газ або процес його окиснення (згоряння) та виділення теплоти за рахунок теплотворної здатності. Так, в роботі [84] параметри пов'язано з вимірюванням густини газу.

Був розроблений і реалізований у вигляді однієї з компонент підсистеми непрямий спосіб вимірювання нижчої теплотворної здатності продуктів парової конверсії, заснований на вимірюванні об'ємної витрати, тиску, температури та перепадів тиску тарувального і досліджуваного газів.

Реалізація запропонованого способу в складі вимірювальної підсистеми виконана наступним чином (рис. 2.10). Перед початком визначення теплотворної здатності продуктів парової конверсії за допомогою витратоміра 3 виконується процедура тарування перетворювача змінного перепаду тиску 8 по тарувальному газу (для розглянутого експериментального стенду використовується повітря). При цьому вимірюється перепад тиску повітря на перетворювачі змінного перепаду тиску 8 (в реалізованому пристрої витратомірної діафрагми). За результатами вимірювання температури і тиску виміряний перепад тиску повітря приводиться до нормальних умов (НУ) блоком системи обробки інформації 10. Після цього за допомогою триходового клапана 5 з витратомірної ємності 1

продукти конверсії етанолу через витратомір 4 подаються на діафрагму 8. При цьому вимірюється перепад тиску потоку продуктів парової конверсії на діафрагмі. За результатами вимірювання температури і тиску перепад тиску продуктів парової конверсії приводиться до НУ блоком 10.

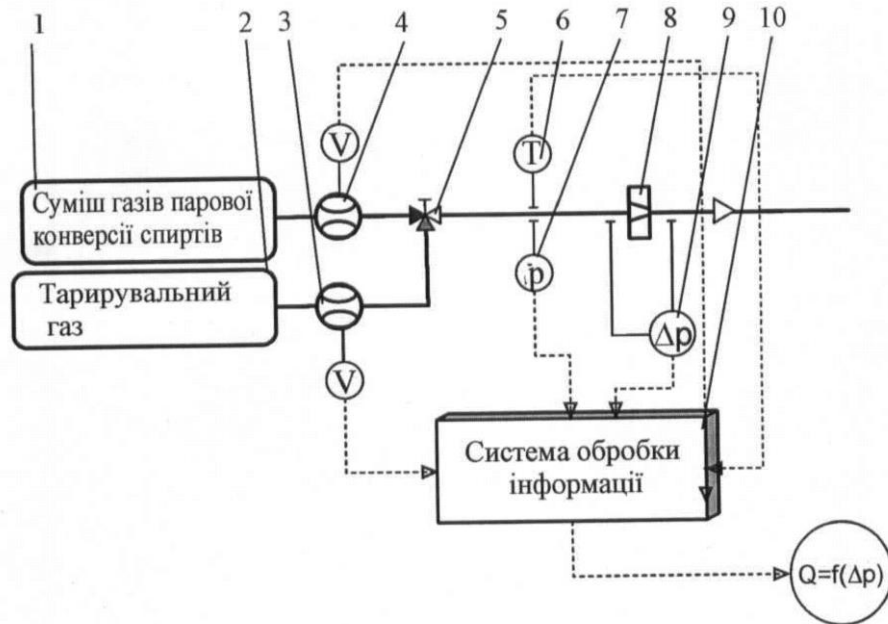


Рисунок 2.10 – Схема пристрою для визначення теплоти згоряння продуктів конверсії етанолу:

- 1 – витратомірна ємність; 2 – ємність тарирувального газу; 3,4 – витратомір;
 5 – триходовий клапан; 6 – датчик температури; 7 – датчик тиску;
 8 – діафрагма; 9 – датчик перепаду тиску; 10 – система обробки інформації

Отримані значення витрати і перепадів тиску дозволяють розрахувати теплотворну здатність продуктів парової конверсії за допомогою емпіричної нелінійної залежності

$$H_{usc} = a \cdot e^{b\bar{\rho}}, \quad (2.10)$$

де H_{usc} – теплотворна здатність продуктів парової конверсії; $\bar{\rho}$ – відносна густина продуктів парової конверсії, визначена як $\bar{\rho} = (\Delta p / \Delta p_T) \cdot (W_T / W)^2$, де Δp та Δp_T – перепади тиску продуктів парової конверсії та повітря на витратомірній діафрагмі, які приведені до НУ; W_T та W – об’ємні витрати повітря та продуктів парової конверсії Е; a та b – коефіцієнти, які залежать від складу суміші газів.

На розроблений спосіб вимірювання теплоти згоряння суміші газів парової конверсії спиртів та пристрій для його здійснення отримано Патент України **на винахід № 114698 [85]**.

Висновки за другим розділом

1. Розроблено загальну методологію дисертаційного дослідження, складено технологічну карту для забезпечення вирішення науково-прикладної проблеми підвищення ефективності використання паливних ресурсів та зменшення викидів токсичних компонентів шляхом раціональної організації перетворень енергії в термохімічних системах утилізації теплоти вторинних енергоресурсів енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

2. Визначено сучасні тенденції аналізу та синтезу складних технічних систем, що надало можливість виявити перспективу використання об'єктно-орієнтованих підходів при розв'язанні питань застосування термохімічних технологій утилізації теплоти вторинних енергоресурсів суднових енергетичних установок.

3. Для теоретичних досліджень процесів в судових енергетичних установках високотехнологічних об'єктів запропоновано використовувати чотири ієрархічних рівня: енергетичний модуль в цілому, підсистеми модуля, блоки обладнання підсистем, а також структурно-функціональні блоки, що моделюють одиничні ланки процесу, з їх поєднанням зв'язками у вигляді матеріальних та енергетичних потоків.

4. Сформульовано завдання експериментальних досліджень ефективності процесів термохімічної обробки палива при тисках, які відповідають умовам підведення паливного газу до теплових двигунів.

5. Проведено модернізацію експериментального стенда для дослідження процесів термохімічної обробки палива при підвищеному тиску, що дає змогу визначити експериментальним шляхом вплив витрат механічної енергії на

ефективність термохімічної утилізації та компонентний склад синтез-газу, який отримано в результаті термохімічної обробки етанолу.

6. Методологія експериментальних досліджень дозволяє виявити основні закономірності термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив та провести верифікацію запропонованих математичних моделей.

7. Розроблено непрямий спосіб вимірювання нижчої теплотворної здатності продуктів парової конверсії (патент України на винахід № 114698), який реалізовано у вигляді однієї з складових підсистеми вимірювання параметрів.

Основні наукові результати розділу опубліковано в [76, 82, 83, 85, 86].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛОВИХ ДВИГУНІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ СУДЕН І МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВИДОБУВАННЯ НА ПРОЦЕСИ ТЕРМОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ ПАЛИВА

3.1 Розробка багаторівневої класифікації схем енергетичних установок високотехнологічних суден та морських об'єктів нафтогазовидобування

Дослідження характеристик існуючих та перспективних енергетичних установок високотехнологічних суден та морських об'єктів нафтогазовидобування потребує надання опису параметрів у вигляді, зручному для подальшої обробки такої інформації. Застосований для дослідження об'єктно-орієнтований підхід передбачає аналіз предмета дослідження у вигляді ієрархічної структури об'єктів, які укладені в відповідні групи. Це вимагає узагальнення та систематизації масиву значень, які надають опис енергетичного комплексу.

Застосування системного підходу дозволило виконати багаторівневу класифікацію основних схем енергетичних установок морського виконання, які знайшли розповсюдження або є можливими до застосування на перспективних високотехнологічних суднах та морських об'єктах нафтогазовидобування (табл. 3.1).

В якості основної класифікаційної ознаки був обраний тип головного двигуна або установки.

Масив значень основної класифікаційної ознаки містить наступні типи двигунів та установок [57]:

- поршневі двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ):
 - D – дизельні (D2S – двотактні, малообертові, D4S – чотирьохтактні, середньобертові);
 - G – з примусовим запалюванням (GE – з іскровим запалюванням);

- турбінні установки:

- GT – газотурбінні (GTE – двигуни простого циклу, GTR – двигуни регенеративного циклу, GTS – контактні установки (STIG); GTC – установки комбінованого циклу);

- ST – паротурбінні (STC – традиційні, STU – з проміжним перегрівом пари);

- комбіновані установки (масив значень визначено комбінацією в табл. 3.1).

Додаткові класифікаційні ознаки:

- тип паливної системи двигуна або установки. Масив значень містить наступні ознаки: SF – однопаливні, DF – двопаливні, TF – трипаливні.






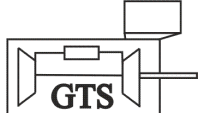
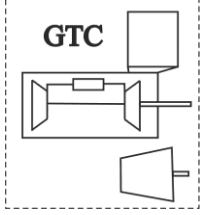
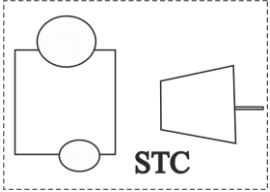
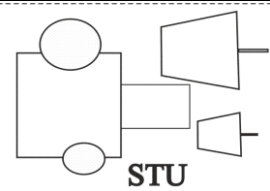
- тип передачі потужності. Масив значень містить наступні ознак: Dr – прямі, M – механічні, El – електричні.

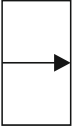
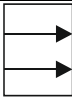
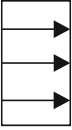
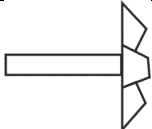
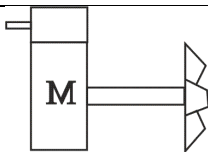

Таблиця 3.1 – Масив значень класифікаційних ознак схем енергетичних комплексів морського виконання

Тип двигуна або установки	Поршневі ДВЗ			Турбінні установки					
	D		G	GT				ST	
	2S	4S	E	E	R	S	C	C	U
	Варіанти складу комбінованої установки: D(2S,4S)+ GE+GT(E,R,S,C)+ ST(C,U)								
Тип паливної системи	Однопаливна								
	SF	SF	SF	SF	SF	SF	SF	SF	SF
	Двопаливна								
	DF	DF	DF	DF	DF	DF	DF	DF	DF
	Трипаливна								
Тип передачі потужності	TF	TF	-	-	-	-	-	TF	TF
	Пряма								
	Dr	-	Dr	-	-	-	-	-	-
	Механічна								
	M	M	M	M	M	M	M	M	M
	Електрична								
	-	El	El	El	El	El	El	El	El

Графічні зображення вказаних класифікаційних ознак надані в табл. 3.2

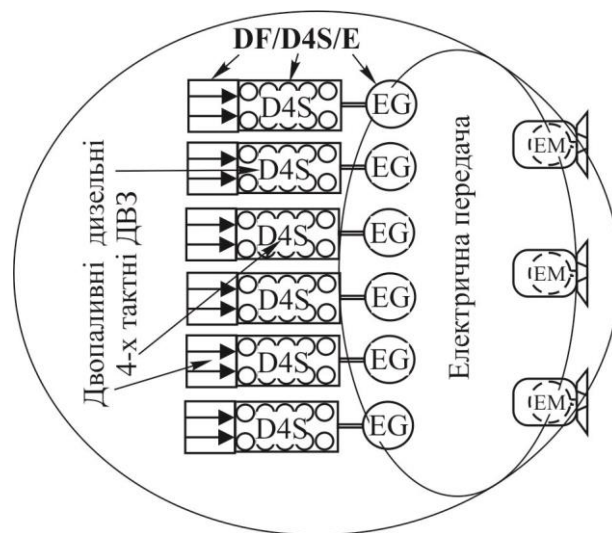
Таблиця 3.2 – Графічні зображення класифікаційних ознак схем енергетичних установок морського виконання

Назва ознаки	Графічне зображення
Тип двигуна або установки	
Поршневі двигуни внутрішнього згоряння	
D2S – дизельні, двотактні, малообертові	
D4S – дизельні, чотирьохтактні, середньобертові	
GE – з примусовим іскровим запалюванням	
Турбінні установки: газотурбінні установки	
GTE – двигуни простого циклу	
GTR – двигуни регенеративного циклу	
GTS – контактні установки (STIG)	
GTC – установки комбінованого циклу	
Турбінні установки: паротурбінні установки	
STC – традиційні	
STU – з проміжним перегрівом пари	

Назва ознаки	Графічне зображення
Додаткові класифікаційні ознаки:	
Тип паливної системи двигуна	SF – однопаливна 
	DF – двопаливна 
	TF – трипаливна 
Тип передачі потужності	Dr – пряма 
	M – механічна 
	El – електрична 

Застосування запропонованої класифікаційної таблиці надає можливість створити загальний опис складу та особливостей енергетичної установки високотехнологічного судна або морського об'єкту нафтогазовидобування у скороченому вигляді. Спочатку позначається тип паливної системи, потім (через /) тип головного двигуна або установки, потім (через /) тип передачі потужності. Наприклад, головна енергетична установка сучасного арктичного газовозу LNG типу *Christophe de Margerie* (сумарною потужністю 64,35 МВт) складається з 6 двопаливних середньобертових двигунів (СОД) фірми Wartsila, які забезпечують енергією 3 гвинтульові колонки Azipod та загальносуднових споживачів [87]. Позначення головної енергетичної установки за запропонованої системою класифікації – DF/D4S/El (рис. 3.1).

Рисунок 3.1 – Графічна інтерпретація позначення головної енергетичної установки газовозу LNG *Christophe de Margerie* за запропонованої системою класифікації



Якщо розглядається комбінована установка, опис складу кожної частини надається в дужках, які об'єднуються знаком +. На рис.3.2 розглянуто графічні інтерпретації позначення двох варіантів головної енергетичної установки перспективного газовозу LNG місткістю 170 тис. м³ [88, 89]. Перший варіант установки передбачає комбіновану установку, яка складається з двопаливного газотурбогенератора з утилізаційним паротурбінним контуром та двох двопаливних дизель-генераторів (рис. 3.2,*а*). Опис такої установки може бути представлений як (DF/GTC/EI)+(DF/D4S/EI). Другий варіант передбачає газопаротурбінну установку, яка складається з двох ГТД та утилізаційного паротурбогенератора. В цьому випадку позначення головної установки DF/GTC/EI (рис. 3.2,*б*).

Енергетична установка швидкісного пасажирського судна HAMANASU [90] (рис. 3.3) виконана комбінованою та складається з чотирьох головних однопаливних СОД, два з яких через редуктор працюють на гребний гвинт, та двох інших, які обертають електричні генератори та за допомогою електричної передачі працюють на гвинторульову колонку. Позначення цієї енергетичної установки – (SF/D4S/M)+(SF/D4S/EI).

В подальшому дослідженні запропонована класифікація була розширена шляхом:

- збільшення масивів значень існуючих класифікаційних ознак;
- включенням додаткових рівнів для існуючих класифікаційних ознак;
- додаванням нових ознак.

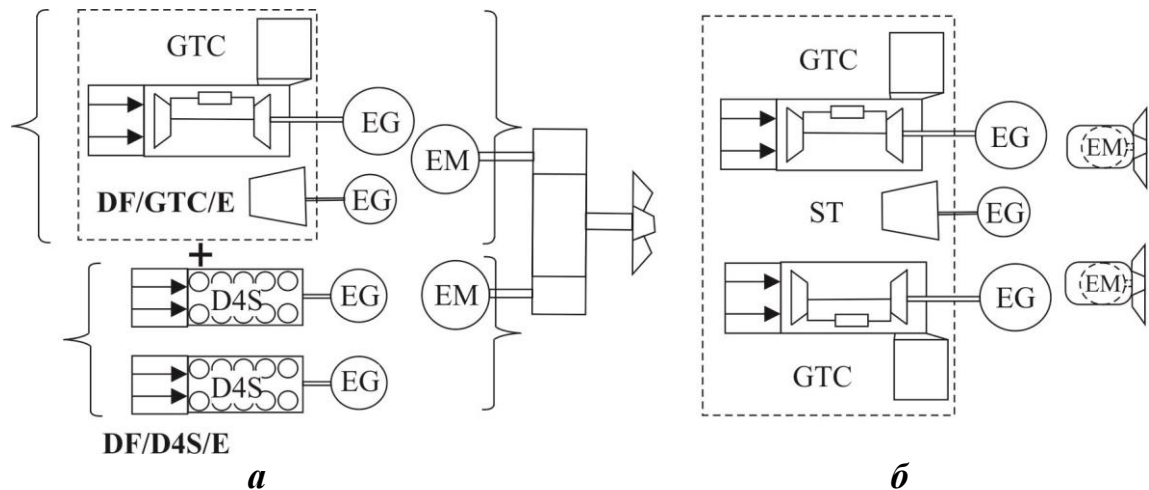
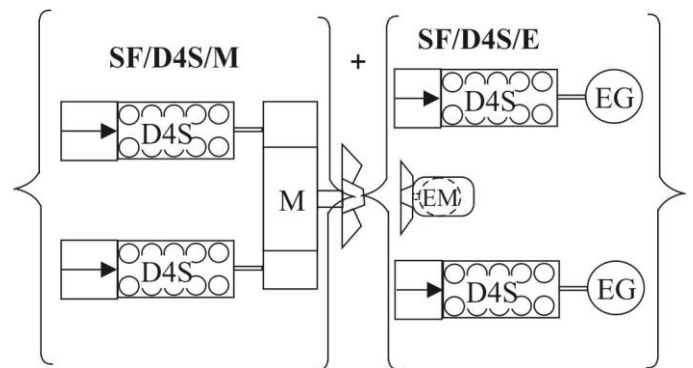


Рисунок 3.2 – Схема суднової енергетичної установки перспективного газозову LNG:

a – (DF/GTC/EI)+(DF/D4S/EI); *б* – DF/GTC/EI

Рисунок 3.3 – Графічна інтерпретація позначення головної енергетичної установки швидкісного пасажирського судна HAMANASU за запропонованою системою класифікації



Так було враховано те, що газоподібне паливо подається в теплові двигуни суднових енергетичних установок під підвищеним тиском. Для малообертових двотактних дизельних двигунів D2S, які працюють на газоподібному паливі, існує два варіанта організації робочого процесу та відповідно два типи двигунів:

- з системою подачі паливного газу низького тиску, в яких газ надходить в робочий циліндр відразу після закриття органів газорозподілу (практична реалізація – двигуни концерну Wärtsilä);
- з системою високого тиску, в яких паливний газ надходить в робочий циліндр безпосередньо перед приходом поршня в ВМТ (практична реалізація – двигуни концерну MAN).

З урахуванням цього, в позначення двотактних дизельних двигунів може

бути наданий додатковий рівень класифікації. Так позначення двопаливного двотактного малообертового дизельного двигуна з системою подачі паливного газу низького тиску – DF/D2SLP, з системою високого тиску – DF/D2SHP.

3.2 Аналіз складу та характеристик енергетичних установок високотехнологічних суден та морських об'єктів нафтогазовидобування

3.2.1 Енергетичні установки морських об'єктів нафтогазовидобування

Склад і характеристики енергетичних установок морських об'єктів нафтогазовидобування коливається в широких межах. Основними приводними двигунами електрогенераторів та технологічних компресорів є газотурбінні двигуни та середньообертові дизельні двигуни.

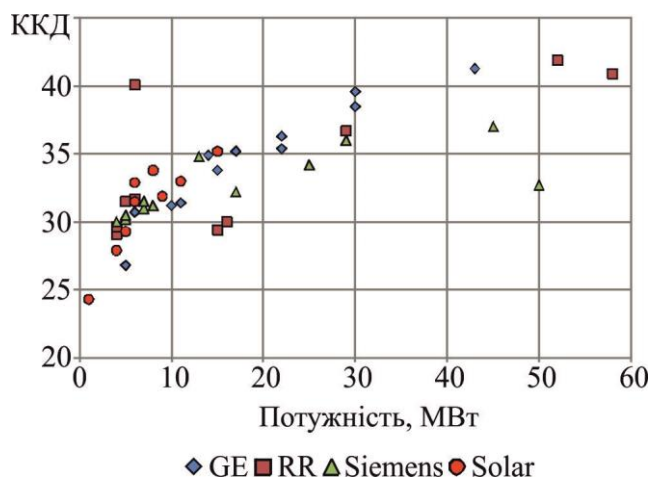
З урахуванням того, що всі глибоководні напівзаглибні платформи і бурові судна вимагають додаткових енерговитрат, так як оснащені потужними системами динамічного позиціонування, витрати на паливо можуть досягати 100000 USD за добу [91]. Для бурових суден та бурових платформ при виборі схем енергетичних комплексів перевага віддається схемам на базі двопаливних СОД або ГТУ: DF/D4S/EI, DF/GTE/EI. Наприклад, енергокомплекс бурового судна Stena Drill MAX виконано за схемою DF/D4S/EI та містить 6×7,29 МВт СОД Wartsila 16V32C [92]. Напівзаглибна плавуча бурова платформа Stena Don містить 9×3,5 МВт ДГ на базі СОД Wartsila 16V25 [93]. Напівзаглибна плавуча бурова платформа Aker H-6e містить 8×5,2 МВт СОД виробництва Rolls Royce (Bergen Diesel) [94].

На офшорних судах і об'єктах нафтогазовидобування знайшли велике поширення ГТД широкого спектра потужності (рис. 3.4) від світових виробників енергетичних ГТУ. За даними [95] тільки компанія Solar Turbine поставила понад 300 ГТД на об'єкти офшорної інфраструктури.

Для енергетичних комплексів FPSO характерне використання газотурбінних та комбінованих установок. Так на судні FPSO Global Producer III енергокомплекс складається з двох ГТД Alstom GT 35 (по 16 МВт) та

утилізаційної установки, що забезпечує теплом усіх споживачів, пов'язаних з технологічним циклом [96].

Рисунок 3.4 – Характеристики потужності та ефективності ГТД суден та об'єктів нафтогазовидобування



Енергетичний комплекс FPSO Armada Olombendo містить 3 двопаливних ГТД потужністю по 21 МВт кожен [97]. Комбінована енергетична установка FPSO Dhirubhai-1 виконана за схемою (DF/GTE/El)+(DF/STC/El). До складу енергокомплексу входять 3×4 МВт ГТГ та 2 головних котла сумарною паропродуктивністю 88 т/год для роботи 3×5 МВт та 2×1 МВт паротурбогенераторів [98].

Енергетичний комплекс FPSO Pioneiro de Libra виконано за комбінованою схемою (DF/GTE/M)+ DF/D4S/El) та складається з трьох ГТГ потужністю 27,5 МВт, які працюють на 50 % навантаженні та 4 ДГ [99]. Енергокомплекс FPSO Cidade de Itajaí виконано за схемою (DF/GTE/El)+(DF/D4S/El). До складу комплексу входять 4 ГТГ потужністю 35 МВт та 2 ДГ потужністю по 2 МВт [100]. На FPSO TRITON застосовуються два газотурбогенератора на базі LM6000 (42 МВт в умовах ISO) [101]. На серії з двох FPSO типу Cidade de Maricá запропонована схема (DF/GTE/M)+ (DF/GTE/El). З чотирьох ГТД LM2500+ для приводу електрогенераторів призначено 3 та один працює як привід компресора. Для проекту FLNG Greater Tortue Ahmeyim було поставлено 4 ГТУ PGT25+ G4 на базі ГТД LM2500+ від основного виробника газотурбінної техніки General Electric. Для FPSO Eni Mexico Area 1 компанія Siemens поставила енергетичний модуль в складі трьох ГТД SGT-A35 (потужність агрегату 34 МВт), а для FPSO Carioca MV30 знадобилося 4 SGT-A35 [102]. Проект Petronas PFLNG-2 [103]

виконано за схемою (DF/GTE/M)+(DF/GTE/EI) та включає до складу чотири PGT25+G4 та два LM6000-PF+ (номінальна потужність ГТД 53 МВт).

На суднах MODU, FPSO, FLNG, FSRU енергетичне обладнання частіше за все розміщується в блоках на головній палубі або в верхній будові платформ (рис. 3.5).

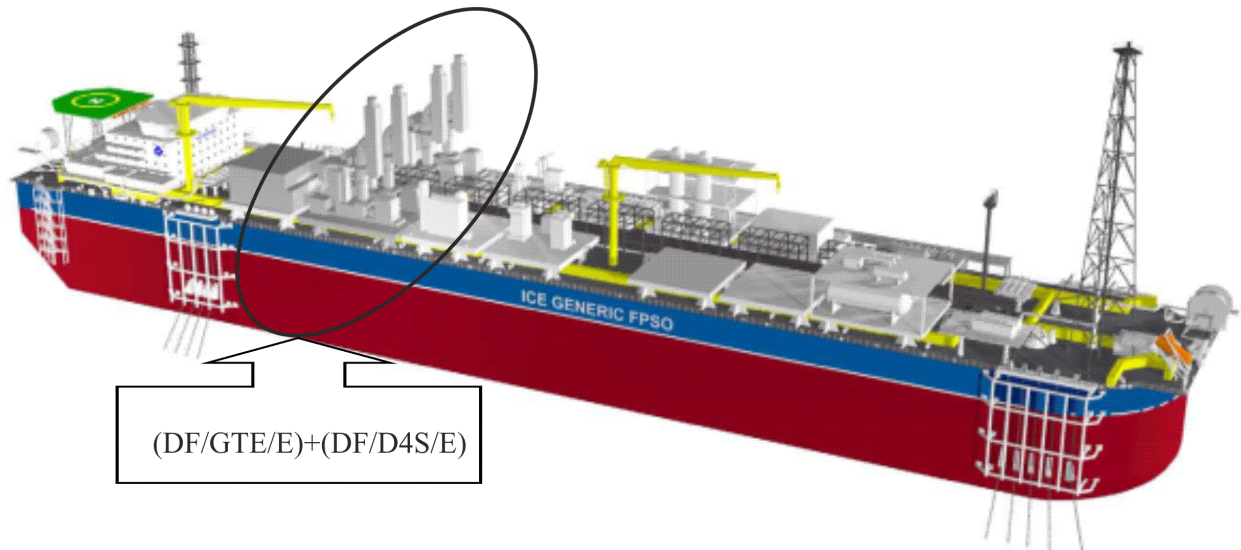


Рисунок 3.5 – Зона розташування енергокомплексу на судні FPSO проекту G-1600-SM [104]

Провідні виробники енергетичного обладнання розробили енергетичні модулі для MODU, FPSO, FLNG, FSRU з дизель-генераторами (DF/D4S/EI) та газотурбогенераторами (DF/GTE/EI) [105–107] (рис. 3.6).

В якості критеріїв порівняння характеристик енергомодулів прийнято такі показники [62]:

- відношення потужність/об'єм

$$\dot{V} = P_e / V_m , \quad (3.1)$$

де P_e – потужність, яка генерується модулем, кВт; V_m – об'єм модулю, м³;

- відношення потужність/маса

$$\dot{M} = P_e / M_m , \quad (3.2)$$

де M_m – маса модуля, т;

- ККД модуля

$$\eta = P_e / (m_f H_U) , \quad (3.3)$$

де m_f – секундна витрата палива, кг/с; H_U – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг.

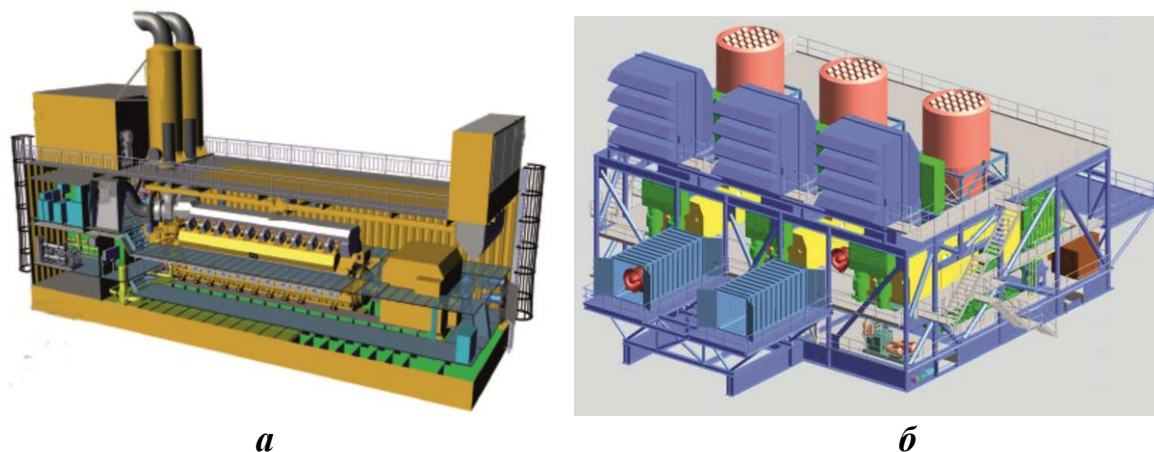


Рисунок 3.6 – Енергетичні модулі морського виконання для суден та плавучих об'єктів нафтогазовидобування:

a – на базі DF/D4S/El фірми Caterpillar [106];

б – на базі DF/GTE/El Siemens [107]

На рис. 3.7 представлені результати порівняння питомих показників потужності (рис. 3.7,*a*; *б*) і ККД (рис. 3.7,*в*) для дизельних і газотурбінних енергетичних модулів у найбільш розповсюджену в офшорному флоті діапазоні потужностей (табл. 3.3).

Енергетичні модулі на базі газотурбінних технологій мають значну перевагу за масо-габаритними характеристиками, але істотно поступаються дизельним варіантам за паливною економічністю.

З метою підвищення ефективності газотурбінних енергетичних установок в багатьох наукових публікаціях запропоновано застосування установок комбінованого циклу [108, 109]. Але досвід експлуатації таких установок на морських бурових платформах Норвегії показав, що великі маси і габарити роблять установки комбінованого циклу недоцільними для морських об'єктів нафтогазовидобування в умовах жорстких вимог щодо зниження ваги надбудови [110]. Крім того встановлено, що існує компроміс між розміром обладнання та ремонтпридатністю в умовах цілорічної експлуатації.

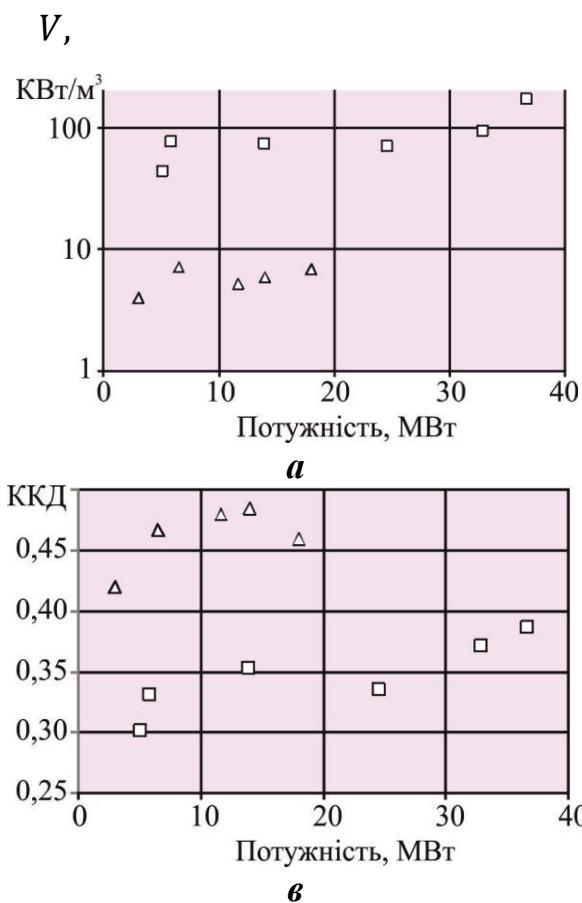


Рисунок 3.7 – Порівняння характеристик енергетичних модулів для суден та об'єктів офшорної інфраструктури:
а – відношення потужність/об'єм;
б – відношення потужність/маса;
в – ККД;
Δ – DF/D4S/EI; □ – DF/GTE/EI

Таблиця 3.3 – Потужність енергетичних модулів морського виконання

Тип енергомодуля	Головний двигун	Потужність, МВт
DF/D4S/EI	18V51/60DF	18
	16CM46DF	14
	12CM43C	11,6
	12CM32C	6,5
	6CM34DF	3
DF/GTE/EI	SGT A35	36,6
	SGT 700	32,8
	SGT 600	24,5
	SGT 400	13,9
	SGT A05	5,8
	SGT 100	5,0

Офшорні судна та плавучі морські об'єкти, як будь-який технічний об'єкт, повинні мати необхідну експлуатаційну працездатність, яка передбачає здатність

об'єкта зберігати на достатньому рівні функціональну працездатність протягом усього терміну експлуатації.

Для MODU, FPSO, FLNG, FSRU, які використовуються в глибоководних і віддалених районах видобутку, вимоги до енергетичного обладнання найбільш жорсткі, так як пов'язані з забезпеченням експлуатаційної працездатності у важких умовах моря.

Одними з основних характеристик експлуатаційної працездатності є надійність і живучість [111, 112]. Ефективним засобом забезпечення надійності та живучості елементів енергетичного обладнання є резервування, тобто використання додаткових засобів і можливостей, які є надлишковими по відношенню до мінімально необхідних для виконання необхідних функцій. Існують різноманітні прийоми резервування (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Основні прийоми резервування [114]

Вид резервування	Принципи реалізації
Структурний	Заснований на введенні надлишкових елементів в склад об'єкту, що має паралельну схему
Навантажувальний	Припускає використання надлишкових виробничих можливостей об'єктів щодо виконання функцій в умовах перевантажень при відмові інших об'єктів
Функціональний	Заснований на можливості використання окремих об'єктів для виконання додаткових функцій в умовах відмови інших об'єктів

У судновій енергетиці найчастіше застосовується структурне резервування, активно використовується і навантажувальне резервування. У той же час найбільш ефективним з точки зору забезпечення економічної ефективності є функціональне резервування, але його реалізація має певні проблеми [113].

Як зазначено в роботах [115, 116] одним з ефективних засобів забезпечення надійного енергопостачання є реалізація структурного резервування шляхом створення надмірної потужності установки, тобто забезпечення можливості підключення резервної потужності в разі відмови основного обладнання. Згідно з цією практикою, яка відповідає вимогам класифікаційних товариств, головні

ГТГ встановлюються в конфігурації $n + 1$, при цьому додатковий блок забезпечує резерв потужності в разі зупинки одного з працюючих агрегатів. Кількість ГТД зазвичай становить 3 або більше, в залежності від вимог та необхідної потужності. Застосування одного агрегату для забезпечення основних виробничих потреб вважається небажаним з точки зору забезпечення експлуатаційної працездатності та практично не застосовується. Використання декількох турбін відносно невеликої потужності надає гнучкість завантаження енергетичного обладнання, якщо є необхідність частої зміни режиму роботи. Але це потребує більшої кількості запусків та зупинок, що негативно позначається на ресурсі агрегатів.

В роботі [117] розглянуто аспекти експлуатації 192 ГТД, що працюють в офшорній інфраструктурі. З представленою аналізу випливає, що середнє завантаження газотурбінного агрегату в процесі експлуатації становить близько 50 %. Встановлено, що 97 % ГТД працюють в складі енергомодуля з більш ніж одним агрегатом та з розподілом навантаження.

З метою зниження викидів CO_2 та NO_x на офшорних суднах можливо застосування ГТД з камерами згоряння типу DLE (Dry Low Emissions). Згідно з [117] зафіксовані випадки, коли робота ГТД з DLE на часткових режимах призводила до значного перевищення емісії NO_x та CO . Крім того встановлено, що істотно впливає на ефективність роботи камер DLE якість паливного газу, вміст метану в якому в умовах використання попутного газу може коливатися від 65 до 85 %.

3.2.2 Енергетичні установки суден-газовозів та круїзних лайнерів

Основним компонентом зрідженого природного газу є метан (87–98 %), а також етан (1,4–9,5 %), пропан (0,4–2,5 %), бутан (0,1–0,5 %) і азот (0,1–0,5 %). Зріджений природний газ транспортується при атмосферному тиску і при температурах нижче точки кипіння метану ($-161,5^\circ\text{C}$). Це дозволяє зменшити об'єм вантажу, що перевозиться, приблизно в 600 разів. У процесі транспортування, за рахунок теплообміну між поверхнями елементів системи

транспортування вантажу та навколишнім середовищем, частина вантажу випаровується. В якості критерію оцінки втрат газу, що випарувався в процесі транспортування (BOG–Boil-Off Gas), прийнята величина швидкості випаровування вантажу (BOR–Boil-Off Rate), яка визначається як процентне відношення втрат за добу V_{BOG} до загального об'єму перевезеного вантажу V_{LNG}

$$BOR = \frac{V_{BOG}}{V_{LNG}}, \text{ \%/добу.} \quad (3.4)$$

За даними [118] для сучасних газозовів у вантажному рейсі $BOR = 0,1-0,15 \%$, а в баластному рейсі – $0,06-0,1 \%$ в залежності від конструктивної схеми і покоління судна.

Перше спеціалізоване судно – газозов Methane Princess було оснащено паротурбінною пропульсивною установкою за схемою SF/STC/M і потужністю 10,2 МВт. Судно швидкістю ходу 17,5 вузлів і вантажомісткістю 27400 м³ експлуатувалося на рейсовій лінії Port of Arzew (Algeria) – Canvey Island (UK) з осені 1964 року. Газозов здійснював 29 рейсів на рік і в кожному рейсі перевозив вантаж, який забезпечував річні потреби приблизно 275 тис. мешканців Великобританії [119].

Паротурбінні установки отримали досить широке поширення на суднах-газозах. До середини 2014 року 274 газозова були оснащені ПТУ. Але якщо в замовленнях на газозови середини 2007 року 40 % припадало на судна з ЕУ схеми SF/STC/M, то в замовленнях на 1 липня 2014 року їх були тільки 8 % від загального числа суден.

Існує два основні варіанти енергетичної установки газозова LNG:

- з обробкою вантажу, що випаровується в процесі транспортування в установці повторного зрідження;
- з використанням вантажу, що випаровується в процесі транспортування в якості палива для енергетичної установки.

Необхідність врахування установок повторного зрідження в складі СЕУ вимагає доповнення класифікації енергетичних установок суден (табл. 3.1) ще одною додатковою ознакою: «Наявність установки повторного зрідження» з

позначкою на схемі + R (при наявності).

До першої групи можливо віднести установки (SF/D2S/Dr)+R, (SF/D4S/El)+R, (SF/STC/M)+R, (SF/GTS/M)+R та інші на базі однопаливних малообертових і середньобертових дизельних двигунів, паротурбінних установок і газотурбінних двигунів та їх комбінацій. З цієї групи реалізовано установки (SF/D2S/Dr)+R – дизельна пропульсивна установка з прямою передачею потужності на гвинт + установка повторного зрідження.

В установках типу DF/TF передбачається використання важкого (HFO), легкого (MDO, MGO) та газоподібного палива (випару вантажу), що забезпечує експлуатаційну гнучкість з можливістю оптимізації навантаження енергетичної установки на різних швидкостях руху судна.

З точки зору визначення перспективних шляхів підвищення ефективності енерговикористання найбільший інтерес представляє варіант з використанням вантажу, що випаровується, в якості палива для енергетичної установки.

Це підтверджується аналізом складу пропульсивних установок газозовів, які були в експлуатації на кінець 2018 р., та змістом книги замовлень (рис. 3.8) [22]. До ознак класифікації двопаливних малообертових двигунів був поданий признак тиску системи подачі газу до двигуна: LP – система низького тиску, HP – система високого тиску.

Аналогічно був виконаний аналіз складу пропульсивних установок круїзних лайнерів (табл. 3.5). Встановлено, що для круїзного лайнера водотоннажністю в 80 тис. т. потреби пропульсивного комплексу складають близько 40 МВт на повному ході, при стоянці з пасажирями на борту потрібно 7 - 9 МВт електроенергії [113]. Енергокомплекси практично всіх сучасних проектів круїзних лайнерів виконано за схемою єдиної електроенергетичної установки.

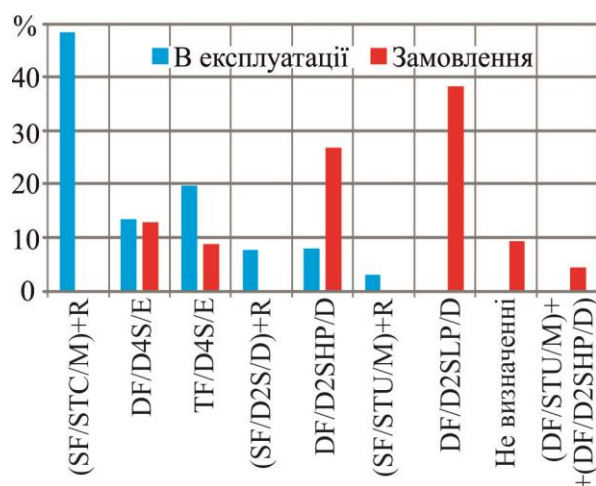


Рисунок 3.8 – Пропульсивні установки газовозів, які були в експлуатації та замовлені на кінець 2018 р.:

DF/D4S/EI – двопаливна дизель-електрична пропульсивна установка;
 DF/D2SHP/Dr – МОД з двопаливною системою високого тиску;
 (SF/STC/M)+R – ПТУ, (SF/STU/M)+R – ПТУ з проміжним перегрівом пари,
 (SF/D2S/Dr)+R – однопаливний МОД з регазифікаційною установкою;
 (DF/STU/M)+(DF/D2SHP/Dr) – двопаливна комбінована установка в складі ПТУ та малообертового двигуна; TF/D4S/EI – трипаливна дизель-електрична пропульсивна установка; DF/D2SLP/Dr – МОД з двопаливною системою низького тиску

Великі витрати електроенергії для загальносуднових потреб, а також необхідність резервування потужності для забезпечення надійної та безпечної експлуатації судна призводять до значної надмірності сумарної потужності установки по відношенню до пропульсивної потужності. Сумарна потужність приводних двигунів єдиної електроенергетичної установки круїзного лайнера на 30% (та більше) перевищує потужність гребних електродвигунів.

Аналіз складу і характеристик пропульсивних комплексів суден-газовозів та круїзних лайнерів виявив, що основні типи енергетичних установок таких високотехнологічних суден створено на базі двопаливних малообертових/середньобертових ДВЗ, двопаливних паротурбінних/газотурбінних установок та їх комбінацій (Significant ships of 2013 – 2019).

Таблиця 3.5 – Характеристики круїзних суден

Найменування серії або судна	Валовий реєстровий тоннаж, тис. рег. т	Швидкість, уз	Тип ЕУ	Потужність ЕУ, МВт
Vista class	84	22	(DF/GTE/EI)+ (DF/D4S/EI)	65,3
Baby Grand class	88	24		58,6
Grand class	113	24		60,7
Queen Mary 2	150	28,5		117,2
Millennium	90,2	24	DF/GTC/EI	57,0
Radiance of the Seas	90	24		59,0
Fantasy-class	70,4	21	DF/D4S/EI	47,5
Breakaway Plus-class	169,1	22,5		76,8
Concordia-class	114,2	19,6		76,6
Edge-class	130,8	21,8	DF/D4S/EI	55
Oasis class	227,7	22,6		97
Quantum class	168,6	22		72,2
Seaside-class	153,5	21,3		62,4
Royal-class	145,3	22		62

3.2.3 Оцінка параметрів суднових теплових двигунів, які впливають на ефективність термохімічної утилізації теплоти вторинних енергоресурсів

Аналіз складу та характеристик енергетичних модулів таких високотехнологічних суден, як плавучі об'єкти нафто газовидобування, газовози та круїзні лайнери, показує, що перевага віддається схемам на базі двопаливних середньобертових 4-х тактних дизельних двигунів (DF/D4S) та газотурбінних двигунів простого циклу (DF/GTE). Частина газовозів оснащена двопаливними малообертовими 2-х тактними дизельними двигунами (DF/D2S).

Основні фактори, які впливають на ефективність термохімічної обробки палива за рахунок утилізації теплоти вторинних енергоресурсів умовно можливо віднести до двох взаємозалежних груп:

1. Фактори, які залежать від характеристик та параметрів теплового двигуна та визначають умови проведення процесу термохімічної обробки базового палива.

2. Фактори, які визначаються характеристиками базового палива та залежать від умов проведення процесу його термохімічної обробки.

До першої групи відносяться наступні параметри:

- температурний потенціал потоків енергоносіїв скидної теплоти двигуна;
- масова витрата вторинних енергоресурсів;
- обмеження, які пов'язані з параметрами системи подачі паливного газу до двигуна.

Для визначення перспективності термохімічної обробки палива за рахунок утилізації скидної теплоти спочатку потрібна попередня оцінка енергетичного потенціалу вторинних енергоресурсів (1 група факторів) з подальшим зіставленням отриманих параметрів з факторами, які визначаються характеристиками базового палива (2 група).

На рис. 3.10 надано зіставлення теплових потенціалів скидної теплоти серійних середньобертових дизельних двигунів та газотурбінних двигунів [58, 120], які можуть застосовуватися в складі енергокомплексів високотехнологічних суден.

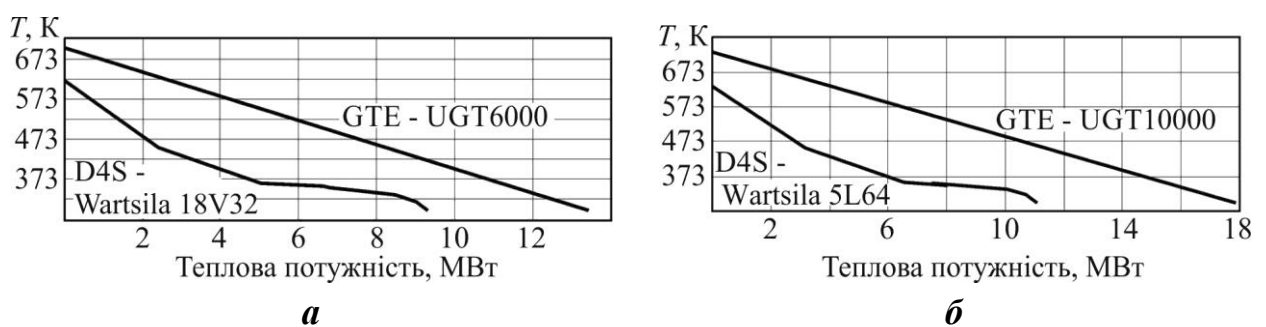


Рисунок 3.10 – Залежність між температурою теплоносіїв та тепловою потужністю скидної теплоти для DF/D4S та DF/GTE:

а – потужність $\approx 6,5$ МВт; **б** – $\approx 10,5$ МВт

Якщо для газотурбінних двигунів скидна теплота практично пов'язана лише з одним джерелом – потоком відпрацьованих газів, то для дизельних двигунів таких джерел декілька, що суттєво ускладнює технологію утилізації вторинних

енергоресурсів. Аналіз температурних потенціалів виявляє для дизельних двигунів пріоритетність використання скидної теплоти відпрацьованих газів. На рис. 3.11 зіставлені температури відпрацьованих газів енергомодулів конфігурацій:

- DF/D4S/EI та DF/GTE/EI, що встановлені на плавучих об'єктах нафтогазовидобутку;

- DF/D2S/D_r та DF/D4S/EI, що встановлені на судах-газовозах.

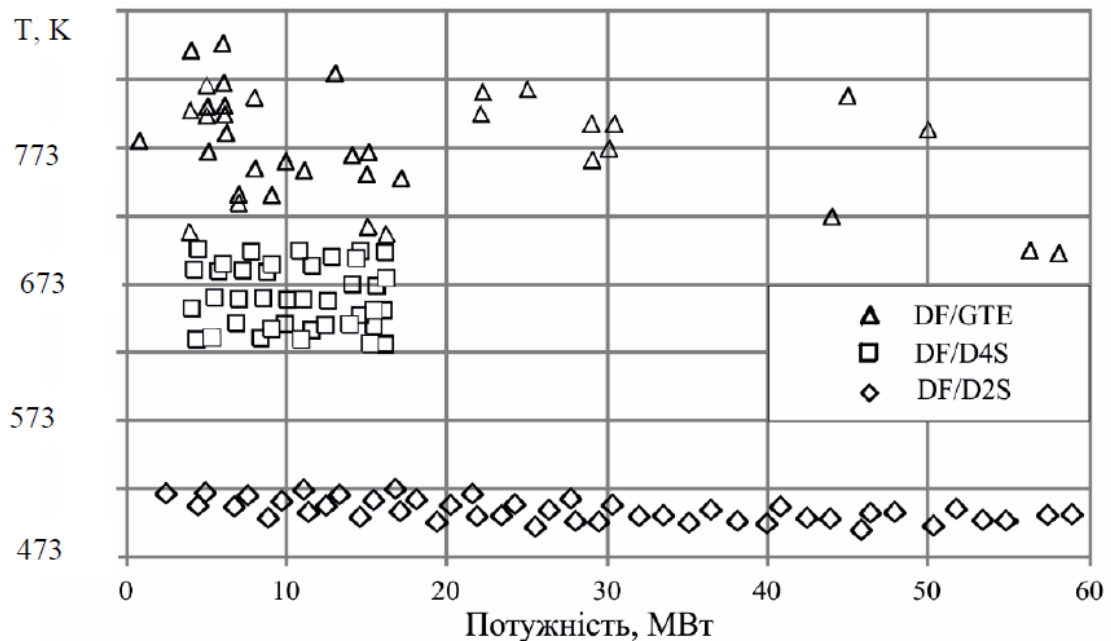


Рисунок 3.11 – Співставлення температурних потенціалів відпрацьованих газів енергетичних установок на базі двигунів DF/GTE, DF/D4S та DF/D2S

Проведений аналіз температурних потенціалів скидної теплоти відпрацьованих газів енергетичних модулів на базі DF/D2S, DF/D4S та DF/GTE свідчить про те що:

- температурний потенціал скидної теплоти енергомодулів DF/D2S/D складає 460–515 K в умовах ISO 3046/1–2002;
- рівень температур вторинних енергоресурсів енергомодулів DF/D4S/E на базі сучасних СОД складає 620–720 K;
- наявний температурний діапазон відпрацьованих газів енергомодулів DF/GTE/E на базі сучасних серійних ГТД складає (620–850 K).

Газоподібне паливо подається в теплові двигуни енергокомплексів під підвищеним тиском. Тиск подачі газоподібного палива до середньобертових

дизельних двигунів DF/D4S складає 0,6–0,7 МПа. Тиск подачі палива до газотурбінних двигунів DF/GTE складає 2–3 МПа, для регенеративних двигунів DF/GTR він знаходиться в межах 1–1,5 МПа. Тиск подачі газоподібного палива для малообертових двигунів DF/D2SHP з системою високого тиску складає до 30 МПа, для двигунів DF/D2SHPLP з системою подачі газу низького тиску до 1,6 МПа. Таким чином, на ефективність процесів парової конверсії можуть впливати обмеження, пов'язані з параметрами системи подачі паливного газу.

Подальше визначення перспективності термохімічної обробки палива за рахунок утилізації скидної теплоти двигунів потребує врахування факторів, які визначаються характеристиками базового палива та залежать від умов проведення процесу його термохімічної обробки.

3.3 Оцінка ефективності термохімічної обробки базового вуглеводневого палива шляхом утилізації вторинних енергоресурсів

3.3.1 Виявлення перспективних базових палив для термохімічної обробки

Утилізація скидної теплоти двигунів і обладнання енергетичних установок дозволяє підвищити ефективність використання енергії палива, в тому числі шляхом термохімічної його обробки. При організації ендотермічних процесів конверсії в умовах роботи двигуна важливим питанням є вибір базової вуглеводневої сполуки, здатної при відносно невисокому середньому рівні скидної теплоти конвертувати в цільові газоподібні продукти заданого хімічного складу (основні горючі компоненти: монооксид вуглецю та водень). В якості базового палива можуть використовуватися як традиційні види, так і палива з низьким вмістом вуглецю, в тому числі, так звані альтернативні. Слід зазначити, що грань між традиційним і альтернативним варіантом завжди умовна і часто актуальна на вельми короткий проміжок часу, після якого альтернативне може стати традиційним. Так в огляді авторитетного класифікаційного товариства Lloyd's Register [121] запропоновано розглядати в якості традиційних суднових палив дві категорії нафтових палив: легкі – MDO/MGO та важкі з різним вмістом сірки – HFO/LSHFO. Решта палив (табл. 3.6), включаючи зріджений природний газ (LNG), що отримав досить широке поширення, запропоновано розглядати в

якості альтернативних.

Найбільш широко в якості палива для суднових двигунів представлено важке паливо HFO. З урахуванням того, що нормативні вимоги ІМО до емісії CO₂ посилюються на кожному новому етапі, застосування палива HFO на етапах 2 (2020–2024 рр.) та 3 (з 2025 р.) без додаткового громіздкого обладнання і дорогих заходів представляється безперспективним. В даний час провідні виробники суднових дизельних двигунів адаптували свою продукцію для роботи на метані та інших альтернативних видах палива. Характеристики основних суднових палив представлені в табл. 3.7.

Цікавим є зіставлення характеристик, що впливають на індекс енергетичної ефективності судна, для основного і альтернативних суднових палив. На рис. 3.12 представлено порівняння з характеристиками важкого палива HFO (його показники прийняті за 1,00) [122].

З аналізу діаграми випливає, що застосування газоподібних палив LPG і LNG дозволяє, при інших рівних умовах, знизити індекс EEDI на 15–17 % (пропан, бутан) і 26 % відповідно, в порівнянні з використанням HFO. Метанол і етанол є паливами з низьким вмістом вуглецю, проте мала теплотворна здатність стримує ефективність їх застосування.

Газоподібне паливо подається до двигунів під підвищеним тиском. Витрати потужності на привід компресорної установки подачі газоподібного палива для двопаливного МОД типу DF/D2SHP можуть становити до 2,8–3,0 % потужності двигуна [123]. При роботі таких двигунів на газоподібному паливі близько 3–5 % припадає на запальну дозу рідкого палива («пілотне» паливо), яким частіше за все є MDO. З урахуванням цих чинників застосування в якості суднового палива бутану, замість традиційного HFO, забезпечує зниження індексу EEDI на 13 %, пропану – на 15 %, а зрідженого природного газу – на 24 % (вказані максимальні значення зниження індексу).

Термохімічна обробка вуглеводневих палив шляхом парової некаталітичного конверсії дозволяє отримати газове паливо з кращими енергетичними та екологічними характеристиками.

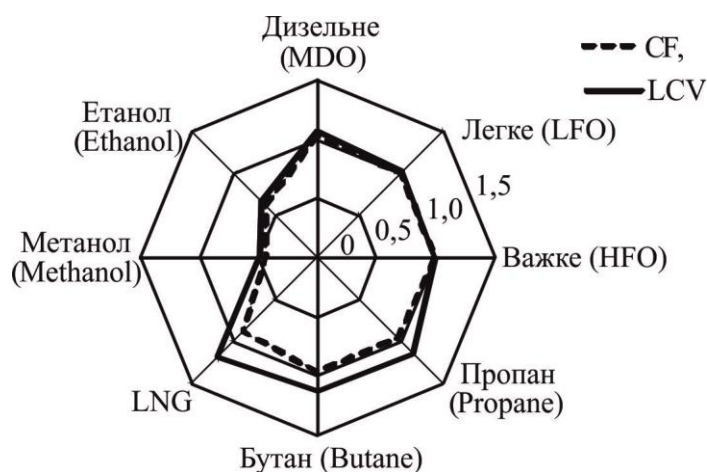
Таблиця 3.6 – Традиційні та альтернативні суднові палива [43, 121]

Назва (позначення)	Тип палива	Вихідна сировина	Коментар
MDO/MGO	Легке, дистилятне	Нафта	Композиція легких фракцій з залишковими, низький вміст сірки
Bio MDO	Легке, біодизель (1, 2 покоління)	Рапсове масло, лігноцелюлоза	Можлива суміш з MDO для зниження викидів парникових газів (GHG)
HFO	Важке, залишкове	Нафта	Основне суднове паливо з конкурентною ціною, але з найбільшим викидом GHG
Bio HFO	Паливо без присадок	Рапсове масло	Можливо для заміни HFO з метою зниження викидів GHG
LSHFO	Залишкове паливо з низьким вмістом сірки	Нафта	Конкурентне за ціною, але з вмістом сірки не більш 0,5% з метою зниження GHG
Bio LSHFO	Еквівалентно Bio HFO	Еквівалентно Bio HFO	Еквівалентно Bio HFO
LNG	Зріджений природний газ	Природний газ	Конкурентне за ціною, забезпечує низькі викиди GHG, активно впроваджується
Bio LNG	Зріджений біогаз	Лігноцелюлоза	Еквівалентно LNG, але з великим терміном окупності зниження викидів GHG
LPG	Зріджений нафтовий газ	Пропан, бутан	Забезпечує низькі викиди GHG
H ₂	Водень	Метан	Не дає викидів вуглецю
Bio H ₂	LNG	Лігноцелюлоза	Еквівалентно H ₂
EtOH	Етанол	Етилен	Має низькі показники вмісту вуглецю
Bio EtOH	Біоетанол	Продукти бродиння	Еквівалентно EtOH
MeOH	Метанол	Метан	Має найбільш низькі показники вмісту вуглецю, підходить для двопаливних двигунів
Bio MeOH	Метанол	Лігноцелюлоза	Еквівалентно MeOH

Таблиця 3.7 – Характеристики основних суднових палив [44]

Тип палива	Позначення палива	Вміст вуглецю	C_F , т CO ₂ /т палива	Нижча теплота згоряння, МДж/кг
Дизельне/газойль (MDO)	ISO 8217 DMX...DMB	0,8744	3,206	42,700
Легке (LFO)	ISO 8217 RMA...RMD	0,8594	3,151	41,200
Важке (HFO)	ISO 8217 RME...RMK	0,8493	3,114	40,200
Зріджений нафтовий газ (LPG)	Пропан (Propane)	0,8182	3,000	46,300
	Бутан (Butane)	0,8264	3,030	45,700
Зріджений природний газ (LNG)	LNG	0,7500	2,750	48,000
Метанол (Methanol)	Метанол	0,3750	1,375	19,900
Етанол (Ethanol)	Етанол	0,5217	1,913	26,800

Рисунок 3.12 – Співставлення характеристик палива HFO та альтернативних палив:
 C_F – коефіцієнт вмісту вуглецю в паливі, LCV – нижча теплотворна здатність палива



Стосовно до енергетичних установок високотехнологічних суден найбільш перспективними паливами для термохімічної обробки можуть бути: LNG, LPG для газовозів і офшорних суден; попутний газ та метанол для офшорних суден та об'єктів нафтогазовидобування; LNG, метанол та етанол для пасажирських суден.

3.3.2 Узагальнена оцінка ефективності термохімічної обробки палива

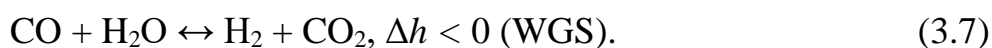
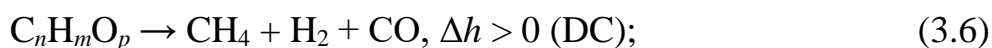
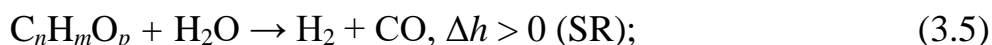
Як було визначено в розділі 1, одним з перспективних шляхів використання термохімічних технологій в судновій енергетиці є термохімічна обробка базового палива шляхом його конверсії за рахунок регенерації/утилізації теплоти відпрацьованих газів теплового двигуна. При цьому приріст ентальпії суміші вуглеводневого палива та окиснювача протікає зі зміною його хімічного складу внаслідок ендотермічних процесів конверсії.

Конверсія вуглеводневих палив може бути здійснена трьома методами [124]:

- парова конверсія (паровий риформінг);
- парціальне окиснення;
- вуглекислотна конверсія («сухий риформінг»).

Для подальшого дослідження обрана парова конверсія вуглеводнів. Вибір зроблено за низкою критеріїв, в першу чергу з оцінки температурного рівню реакції, приросту теплотворної здатності і величини утилізованого теплового потоку, а також за кількістю одержуваного водню, теплотою реакції і її швидкості та деяким іншим.

Термохімічна обробка, яка полягає в паровій конверсії вуглеводневих палив, супроводжується ендотермічними реакціями парового риформінгу (SR) та декомпозиції (DC), які вимагають підведення теплоти (+ Δh), а також екзотермічної реакцією (- Δh) конверсії водяного газу (WGS).



Таким чином, головними компонентами синтез-газу, які можуть бути отримані в результаті парової конверсії є H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2O .

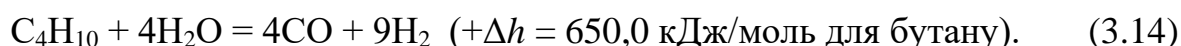
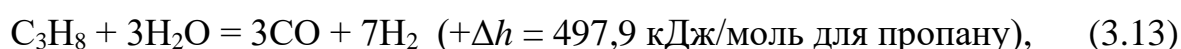
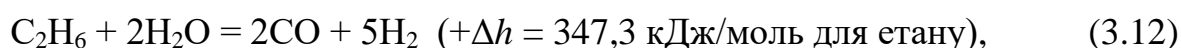
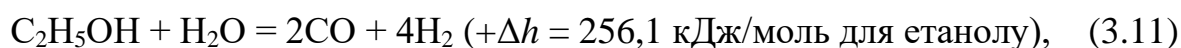
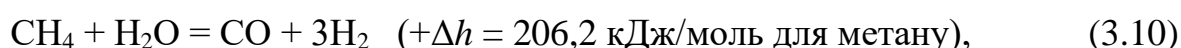
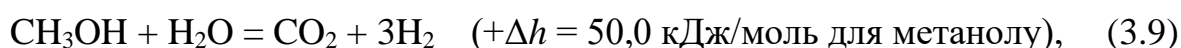
Для проведення реакцій парової конверсії необхідно підвести теплоту з зовнішнього джерела. Таким джерелом при термохімічній утилізації служить теплота вторинних енергоресурсів двигунів.

При паровій конверсії основна реакція SR для вуглеводневих палив може бути визначена як [125]



$$\Delta h = (2n - 2x - p) \Delta h_{H_2O} + \Delta h_f - n \Delta h_{CO_2}.$$

Для основних базових альтернативних палив і їх компонентів, якими є метанол, етанол, метан, етан, пропан, бутан, реакції парової конверсії представлено у вигляді [125,126]:



У першому наближенні перспективність використання того чи іншого типу вуглеводневого палива при термохімічній утилізації може бути проаналізована за залежністю різниці теплотворної здатності продуктів конверсії H_U^K та базового палива H_U^B від температури реакції T_{THR} .

При моделюванні процесів термохімічної обробки вуглеводневих палив шляхом парової конверсії розглядалися процеси в реакторі, модель якого заснована на матеріальному балансі і балансі енергії (рис. 3.13). Кількість кожного компонента $q_{A...n \text{ in}}$, що надходить в систему, відома, а мета полягає в тому, щоб визначити вихідний склад $q_{A...n \text{ out}}$ в умовах проведення процесу.

Основою для розрахунку матеріального балансу є стехіометричні рівняння хімічних реакцій. Враховано, що у хімічних реакціях відбувається зміна молярної кількості речовин

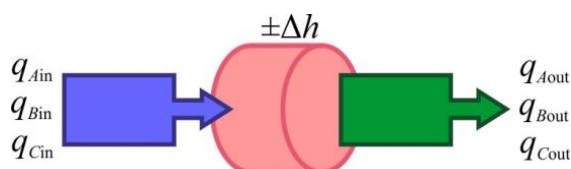
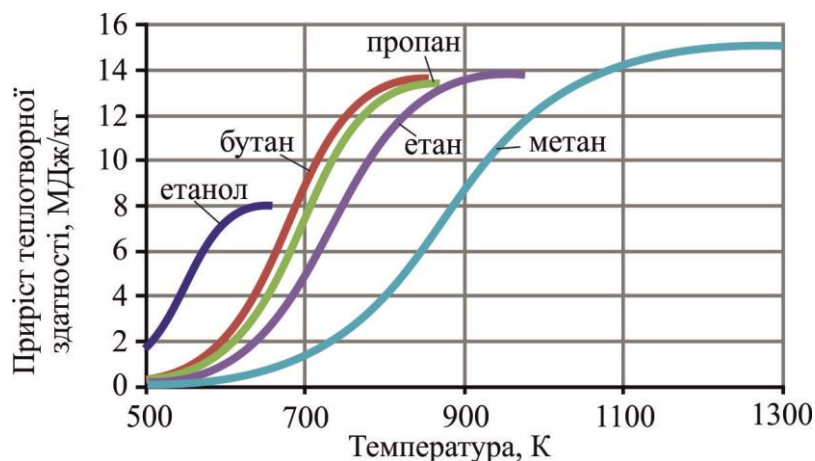


Рисунок 3.13 – Схема блоку реактора

$$\Delta q_A = q_{Ain} - q_{Aout}. \quad (3.15)$$

Розрахунок процесів конверсії вуглеводневих палив за умов використання констант рівноваги основних реакцій та при тиску процесів 0,1 МПа дозволив проаналізувати вплив температури процесу на приріст теплотворної здатності (рис. 3.14).

Рисунок 3.14 – Залежність приросту теплотворної здатності від температури реакції парової конверсії при термохімічній обробці



Результати розрахунку оброблено методом регресійного аналізу [59, 127, 128] для наявного діапазону температур і представлено у вигляді залежностей

$$\Delta H_U = f(T_{THR}), \quad (3.16)$$

де $\Delta H_U = H_U^K - H_U^B$; H_U^K - теплотворна здатність продуктів конверсії; H_U^B – теплотворна здатність базового палива.

Для етанолу результат отримано у вигляді:

$$\begin{aligned} \Delta H_U^{Eth} = & (2,3272241 \cdot 10^{-10}) \cdot T_{THR}^5 - (3,2939725 \cdot 10^{-7}) \cdot T_{THR}^4 + \\ & + (1,8092345 \cdot 10^{-4}) \cdot T_{THR}^3 - 0,048113 \cdot T_{THR}^2 + 6,231876 \cdot T_{THR} - 315,9218822. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Для основних компонентів природного / попутного газу отримано наступні залежності:

- бутан

$$\begin{aligned} \Delta H_U^{But} = & (2,5375724 \cdot 10^{-11}) \cdot T_{THR}^5 - (5,1313053 \cdot 10^{-8}) \cdot T_{THR}^4 + \\ & + (3,9415367 \cdot 10^{-5}) \cdot T_{THR}^3 - 0,0142466 \cdot T_{THR}^2 + 2,4429205 \cdot T_{THR} - 159,9790408; \end{aligned} \quad (3.18)$$

- пропан

$$\Delta H_U^P = (5,9146684 \cdot 10^{-14}) \cdot T_{THR}^6 - (1,2891662 \cdot 10^{-10}) \cdot T_{THR}^5 + (1,1009637 \cdot 10^{-7}) \cdot T_{THR}^4 - (4,7002096 \cdot 10^{-5}) \cdot T_{THR}^3 + 0,0106758 \cdot T_{THR}^2 - 1,2291116 \cdot T_{THR} + 56,2031142; \quad (3.19)$$

- етан

$$\Delta H_U^E = (1,3438138 \cdot 10^{-14}) \cdot T_{THR}^6 - (2,9040517 \cdot 10^{-11}) \cdot T_{THR}^5 + (2,2812194 \cdot 10^{-8}) \cdot T_{THR}^4 - (7,7418685 \cdot 10^{-6}) \cdot T_{THR}^3 + (9,9878204 \cdot 10^{-4}) \cdot T_{THR}^2 + 0,0169935 \cdot T_{THR} - 9,44105; \quad (3.20)$$

- метан

$$\Delta H_U^M = -(6,0197345 \cdot 10^{-18}) \cdot T_{THR}^7 + (2,5780853 \cdot 10^{-14}) \cdot T_{THR}^6 - (4,4700353 \cdot 10^{-11}) \cdot T_{THR}^5 + (4,0253939 \cdot 10^{-8}) \cdot T_{THR}^4 - (2,0191104 \cdot 10^{-5}) \cdot T_{THR}^3 + 0,0056732 \cdot T_{THR}^2 - 0,830873 \cdot T_{THR} + 49,1241714. \quad (3.21)$$

Склад природного газу, і, відповідно LNG, варіюється в досить широких межах, що може впливати на ефективність термохімічної обробки.

Основними компонентами природного газу є метан, етан, пропан, бутан і азот. Також можуть бути присутніми ізобутан, ізопентан та інші важкі вуглеводні, оксид і діоксид вуглецю, азот і вода.

Для подальшого дослідження використовується підхід [129, 130], що передбачає класифікацію природного газу за густиною (табл. 3.8).

Таблиця. 3.8 – Класифікація LNG та його характеристики

Характеристика	Позначення	Розмірність	Тип LNG		
			Light	Medium	Heavy
Густина	ρ	кг/м ³	427,7	445,7	464,8
Компоненти:					
метан	Y_M	%	98,0	92,0	87,0
етан	Y_E		1,4	6,0	9,5
пропан	Y_P		0,4	1,0	2,5
бутан	Y_{But}		0,1	0,0	0,5
азот	Y_N		0,1	1,0	0,5

Залежність приросту теплотворної здатності продуктів конверсії природного газу (LNG) від температури реакції $\Delta H_U = f(T_{THR})$ отримано у вигляді

$$\begin{aligned} \sum \Delta H_U = & Y_M \cdot [a_M \cdot T_{THR}^7 + b_M \cdot T_{THR}^6 + c_M \cdot T_{THR}^5 + d_M \cdot T_{THR}^4 + e_M \cdot T_{THR}^3 + \\ & + f_M \cdot T_{THR}^2 + g_M \cdot T_{THR} + h_M] + Y_E \cdot [a_E \cdot T_{THR}^6 + b_E \cdot T_{THR}^5 + c_E \cdot T_{THR}^4 + d_E \cdot T_{THR}^3 + \\ & + e_E \cdot T_{THR}^2 + f_E \cdot T_{THR} + g_E] + Y_P \cdot [a_P \cdot T_{THR}^6 + b_P \cdot T_{THR}^5 + c_P \cdot T_{THR}^4 + d_P \cdot T_{THR}^3 + \\ & + e_P \cdot T_{THR}^2 + f_P \cdot T_{THR} + g_P] + Y_{But} \cdot [a_{But} \cdot T_{THR}^5 + b_{But} \cdot T_{THR}^4 + c_{But} \cdot T_{THR}^3 + \\ & + d_{But} \cdot T_{THR}^2 + e_{But} \cdot T_{THR} + f_{But}], \end{aligned} \quad (3.22)$$

де a, b, c, d, e, f, g, h – коефіцієнти, які отримано шляхом обробки результатів розрахунків методами регресійного аналізу.

Даний укрупнений підхід досить широко використовується для оцінки ефективності парової конверсії базового палива при термохімічній утилізації, але не дозволяє в повній мірі врахувати вплив на ефективність конверсії як параметрів вторинних енергоресурсів, так і обмежень, що накладаються на процес конверсії параметрами системи подачі газоподібного палива в двигун. Крім того, при такому підході не враховується вплив процесів термохімічної обробки на вміст вуглецю в отриманому синтез-газі.

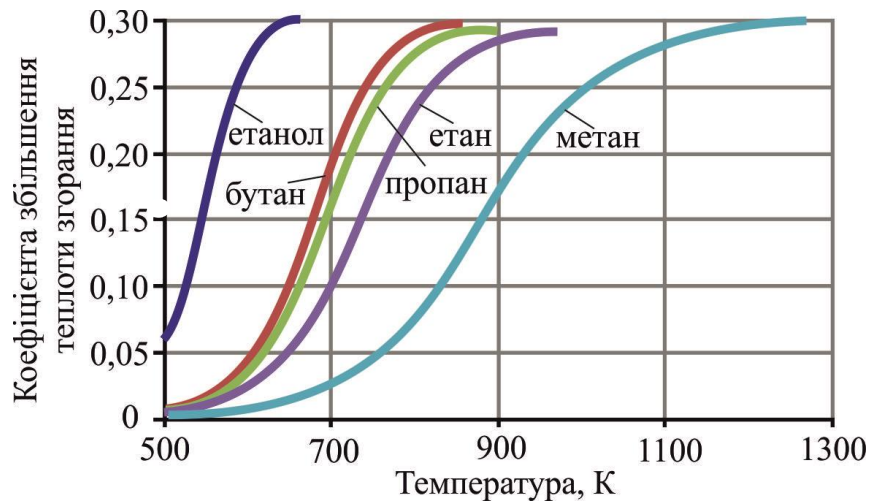
3.3.3 Вплив основних параметрів процесів парової конверсії на ефективність термохімічної обробки вуглеводневого палива

Для подальших досліджень в якості основного критерію оцінки енергоефективності процесів термохімічної обробки вуглеводневих палив шляхом парової конверсії запропоновано використовувати коефіцієнт збільшення теплоти згоряння базового палива [131]. Запропонований критерій визначається як

$$\overline{H}_U = \frac{\Delta H_U}{H_U^B}, \quad (3.23)$$

де $\Delta H_U = H_U^K - H_U^B$ – зміна теплотворної здатності продуктів конверсії H_U^K (кДж/кг) по відношенню до характеристик базового палива H_U^B (кДж/кг). При цьому теплотворна здатність отриманих в результаті конверсії компонентів синтез-газу перераховується на 1 кг базового палива (рис. 3.15).

Рисунок 3.15 –
Залежність
коефіцієнта
збільшення теплоти
згорання від
температури реакції
парової конверсії
вуглеводневих
палив при тиску 0,1
МПа



В якості критерію оцінки ефективності конверсії вуглеводнів, що містяться в природному або попутному газі, була прийнята ступінь конверсії відповідного вуглеводню (метан, етан, пропан, бутан, пентан).

Ступінь конверсії визначається як

$$\zeta = (q_{in} - q_{out}) / q_{in}, \quad (3.24)$$

де q_{in} – мольна/масова частка відповідного вуглеводню в базовому паливі; q_{out} – мольна/масова частка відповідного вуглеводню в продуктах конверсії.

Як зазначалося вище, важливою характеристикою процесу є вміст вуглецю в паливі. При термохімічній обробці вуглеводневих палив будемо розглядати вміст вуглецю в синтез газі, отриманому при паровій конверсії.

Вміст вуглецю в синтез-газі може бути визначено за методикою [132]:

$$CC_{Mixture} = \frac{\sum_{i=1}^{\#of_Components} (n \cdot AW_{Carbon} \cdot Xm_i)}{\sum_{i=1}^{\#of_Components} (MW_i \cdot Xm_i)}, \quad (3.25)$$

де $CC_{Mixture}$ – масовий вміст вуглецю у суміші; n – число атомів вуглецю в компоненті; AW_{Carbon} – атомна маса вуглецю; MW_i – молекулярна вага компоненту i ; Xm_i – мольна частка компоненту.

Для визначення раціональних параметрів системи термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів (ВЕР) шляхом парової некаталітичного конверсії вуглеводневого базового палива необхідно провести комплексний аналіз впливу температури процесу конверсії T_{THR} , тиску процесу конверсії p_{THR} , а також

відношення водяна пара / базове паливо s/bf на зміну нижчої теплотворної здатності, яка виражається в формі коефіцієнта збільшення теплоти згоряння базового палива:

$$\overline{H}_u = f(T_{THR}, p_{THR}, s/bf). \quad (3.26)$$

Реактор-риформер розглядався як хіміко-технологічна система, в якій протікають фізико-хімічні процеси парової некаталітичної конверсії при заданих значеннях параметрів $T_{THR}, p_{THR}, s/bf$.

Для рівноваги хіміко-технологічної системи з постійним хімічним складом потрібно виконання трьох загальних умов:

- загальна енергія Гіббса всіх компонентів (реагентів, продуктів і інертних речовин) зводиться до мінімуму;
- для кожного елемента, який складає систему, кількість молей протягом процесу залишається постійною;
- сумарний заряд системи дорівнює нулю.

Схема моделювання базувалася на загальноприйнятих підходах до опису термохімічних перетворень. Відповідно до сформованої практики моделювання процесів термохімії, для розрахунку фазової рівноваги використовувалися методи, засновані на застосуванні рівняння стану. Такий підхід найбільш зручний, так як рівняння має аналітичну форму та досить компактно містить максимум інформації про досліджуваний процес. Необхідно враховувати, що для багатокомпонентної системи (на відміну від чистих речовин) рівняння стану є термодинамічною моделлю рівноваги парової та рідкої фаз окремо. Для розрахунків термодинамічних властивостей та фазових рівноваг різних речовин найбільшого поширення набули кубічні рівняння стану [133–137]. Перелік найбільш поширених кубічних рівнянь стану наданий на рис. 3.16.

Рівняння стану Пенга-Робінсона найбільш часто використовують для опису поведінки вуглеводневих сумішей. Загальний вигляд рівняння стану у формі рівняння Пенг-Робінсона наступний:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m(V_m + b)}, \quad (3.27)$$

де a , b – параметри рівняння стану; α – функція, яка враховує вплив критичних параметрів і ацентричного фактору; P – тиск; V_m – молярний об'єм; T – температура; R – універсальна газова стала.



Рисунок 3.16 – Класифікаційна схема найбільш поширених кубічних рівнянь стану

Параметри рівняння стану можуть бути визначені як

$$\begin{cases} a = 0,45724R^2 \frac{T_c^2}{P_c}; \\ b = 0,07780R \frac{T_c}{P_c}; \\ \alpha = \left[1 + (0,374664 + 1,542261\omega - 0,26992\omega^2)(1 - T_r^{0,5}) \right], \end{cases} \quad (3.28)$$

де T_r – відносна температура (T/T_c); T_c – критична температура; P_r – відносний тиск (P/P_c); P_c – критичний тиск; ω – ацентричний фактор, який враховує наскільки форма молекули речовини відрізняється від сферичної.

Рівняння Пенга-Робінсона може бути представлено у вигляді поліному

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0, \quad (3.29)$$

де $Z = PV/(RT)$ – коефіцієнт стиснення; $A = a \cdot \alpha P / (R^2 T^2)$; $B = bP/(RT)$.

Триконстантне рівняння Пенга-Робінсона з модифікацією Бостон–Матіаса (модель PR-BM) отримало широке розповсюдження при моделюванні процесів фазового та хімічного перетворення вуглеводневих систем:

$$P = \frac{RT}{c + V_m - b} - \frac{a}{(c + V_m)(c + V_m + b) + b(c + V_m - b)}, \quad (3.30)$$

де: $b = \sum_i b_i x_i$; $a = a_0 + a_1$; $a_0 = \sum_i \sum_j x_i x_j (a_i a_j)^{0,5} (1 - k_{ij})$; $k_{ij} = k_{ij}^{(1)} + k_{ij}^{(2)} T + \frac{k_{ij}^{(3)}}{T}$;

$k_{ij} = k_{ji}$ – коефіцієнт бінарної взаємодії (між i -тим і j -тим компонентом);

$$a_1 = \sum_{i=1}^n x_i \left(\sum_{j=1}^n x_j ((a_i a_j)^{1/2} l_{i,j})^{1/3} \right)^3; \quad l_{ij} = l_{ij}^{(1)} + l_{ij}^{(2)} T + \frac{l_{ij}^{(3)}}{T}; \quad l_{ij} = l_{ji}; \quad a_i = f(T, T_{ci}, p_{ci}, \omega_i); \quad b_i =$$

$$f(T_{ci}, p_{ci}); \quad V = V_m - c; \quad c = \sum_i x_i c_i; \quad c_i = 0,50033 \frac{R_{ci} T_{ci}}{P_{ci}} (0,25969 - z_{RA}).$$

Дослідження проводилося в декілька етапів:

- дослідження впливу параметрів процесу на ступінь трансформації метану шляхом парової некаталітичної конверсії;
- дослідження процесів термохімічної обробки природного газу паровою некаталітичною конверсією;
- дослідження процесів термохімічної обробки попутного газу шляхом парової некаталітичної конверсії;
- дослідження процесів термохімічної обробки метанолу та етанолу паровою конверсією.

Дослідження процесів термохімічної обробки метану

Так як основним компонентом газоподібного палива на базі природного / попутного газу є метан, то на першому етапі проведено дослідження впливу тиску в реакторі на склад синтез-газу при паровій некаталітичній конверсії метану в умовах варіювання відношення водяна пара / газ при фіксованому значенні температури в реакторі.

Склад отриманого в результаті конверсії синтез-газу визначався за сухими компонентами. Для цього при моделюванні враховувались процеси охолодження отриманого синтез-газу в конденсаторі при атмосферному тиску, а також подальше видалення конденсату (рис. 3.17).

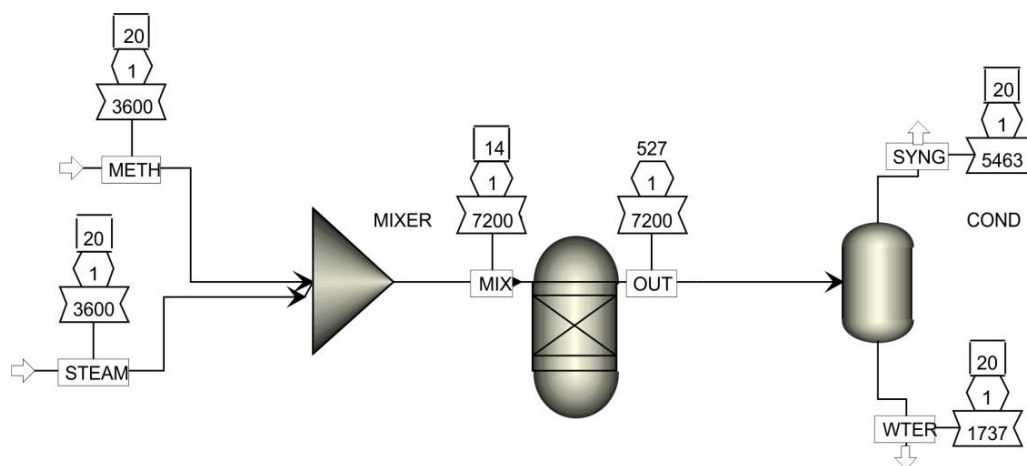


Рисунок 3.17 – Розрахункова схема процесу парової некаталітичної конверсії метану з подальшою дегідрацією отриманого синтез-газу

На рис. 3.18–3.19 представлено результати математичного моделювання, згідно з якими зростання тиску в реакторі приводить до зміщення області ефективності конверсії метану в зону більш високих температур. Це збігається з результатами досліджень інших авторів [138, 139]. Виявлено, що ефективна конверсія при підвищеному тиску вимагає збільшення частки пари, що подається в реактор.

При математичному моделюванні процесів термохімічної обробки метану особливу увагу приділено дослідженню впливу основних параметрів процесу термохімічної обробки на вміст вуглецю в синтез-газі CC_{Syngas} , отриманому при паровій конверсії метану:

$$CC_{Syngas} = f(T_{THR}, p_{THR}, s / bf). \quad (3.30)$$

Зразок результатів розрахунку в табличній формі представлено в табл. 3.9.

В графічному вигляді результати представлено на рис. 3.20.

У табл. 3.10 представлено зведені результати розрахунку вмісту вуглецю в продуктах термохімічної обробки метану шляхом парової конверсії в дослідженому діапазоні температур.

З урахуванням отриманих результатів подальші дослідження були спрямовані на виявлення впливу параметрів процесу конверсії на приріст теплоти згоряння. На рис. 3.21 показано коефіцієнт збільшення теплоти згоряння при різних умовах протікання процесу. При цьому теплотворна здатність

продуктів конверсії перераховувалася на 1 кг метану.

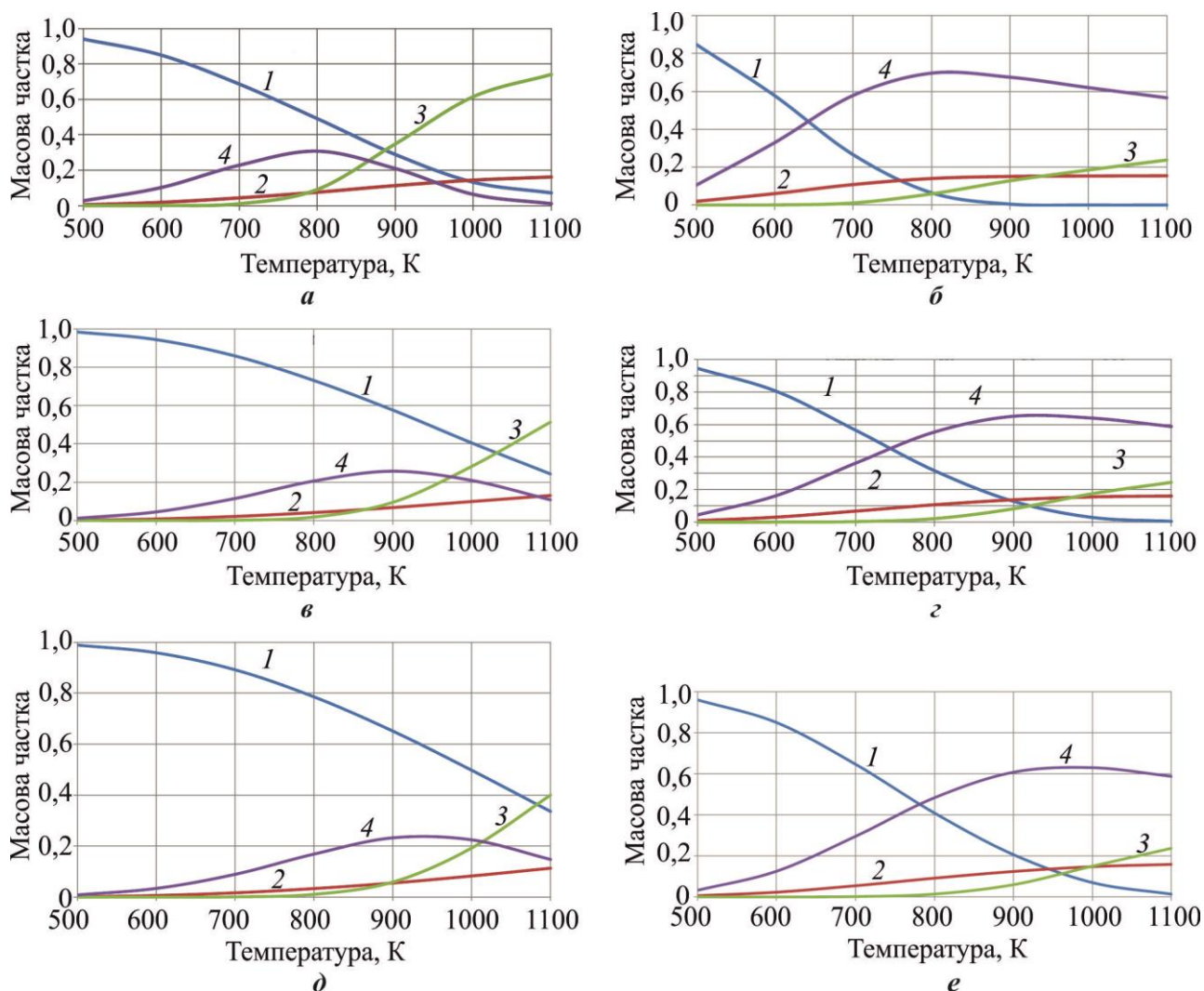


Рисунок 3.18 – Вплив тиску, температури процесу та відношення пара/метан на компонентний склад продуктів парової конверсії метану (масові частки):

a – тиск 0,1 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 1$; *б* – тиск 0,1 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 8$; *в* – тиск 1,0 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 1$; *г* – тиск 1,0 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 8$; *д* – тиск 2,0 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 1$; *е* – тиск 2,0 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 8$; 1 – CH₄; 2 – H₂; 3 – CO; 4 – CO₂

Дослідження процесів термохімічної обробки природного газу.

Виявлені закономірності впливу параметрів процесу термохімічної обробки на склад та властивості продуктів парової конверсії метану враховано при моделюванні процесів термохімічної обробки природного газу різного складу.

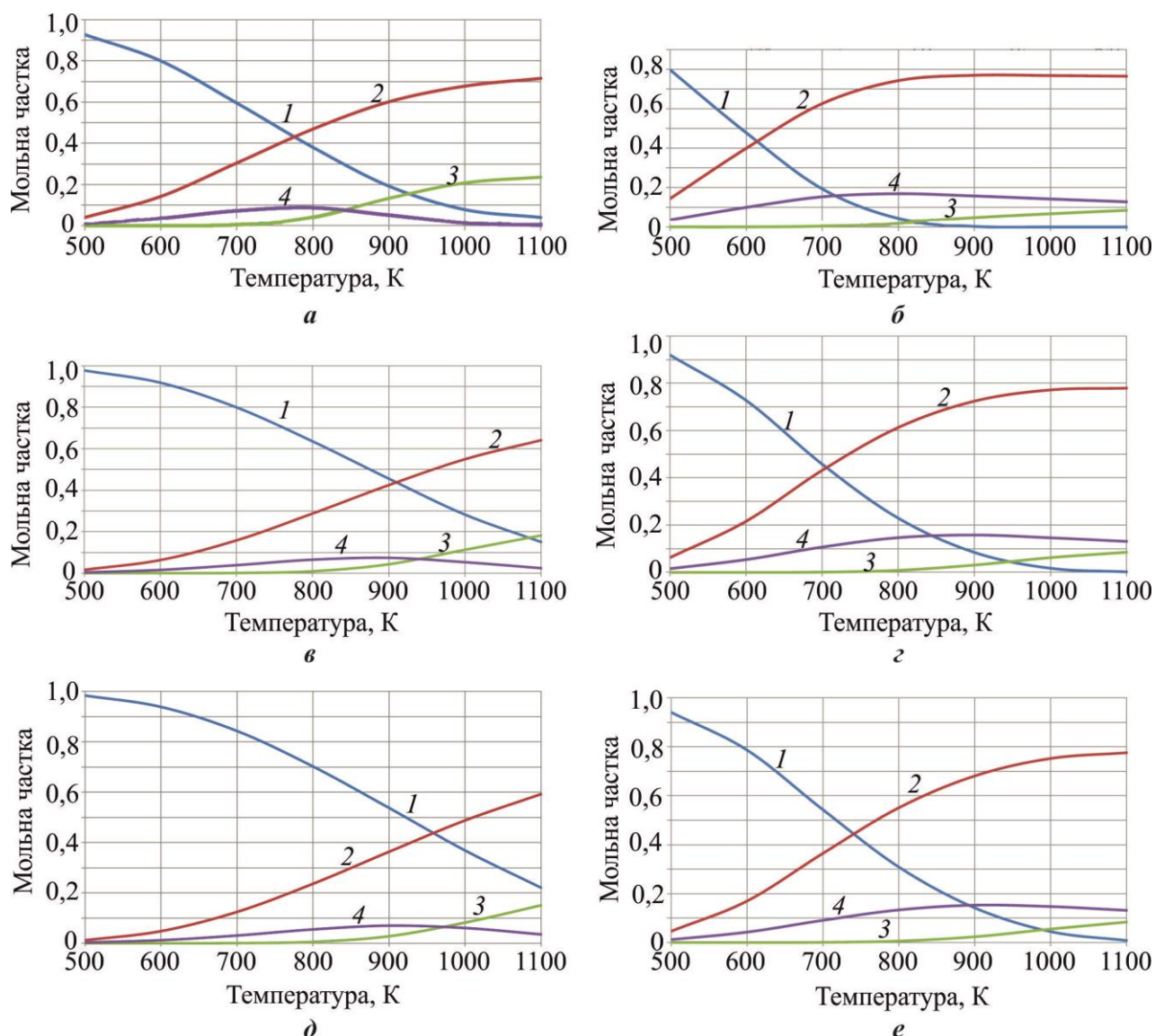


Рисунок 3.19 – Вплив тиску, температури процесу та відношення пара/метан на компонентний склад продуктів парової конверсії метану (мольні частки):

a – тиск 0,1 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 1$; **б** – тиск 0,1 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 8$; **в** – тиск 1,0 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 1$; **г** – тиск 1,0 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 8$; **д** – тиск 2,0 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 1$; **е** – тиск 2,0 МПа, відношення $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 = 8$; 1 – CH_4 ; 2 – H_2 ; 3 – CO ; 4 – CO_2 ; 5 – H_2O

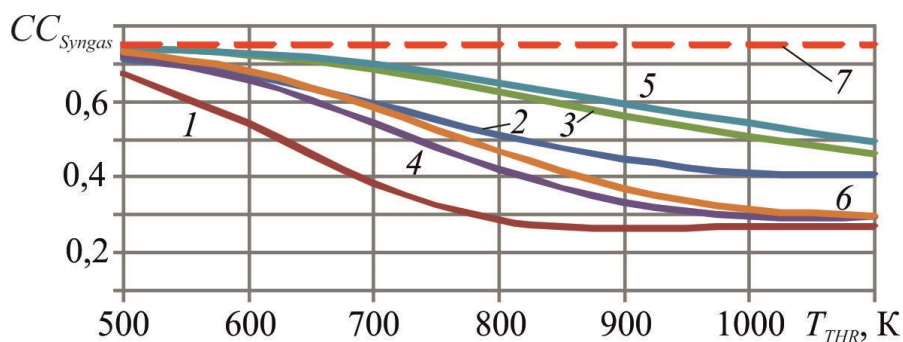
На рис. 3.22 показано приріст теплоти згоряння (по відношенню до теплотворної здатності базового палива) при термохімічній обробці 1 кг природного газу. Склад природного газу (масові частки) брався наступним: $\text{CH}_4 = 92,0\%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 4,3\%$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 2,9\%$; $\text{Ar} = 0,8\%$.

Подальші комплексні дослідження впливу температури T_{THR} , тиску p_{THR} та відношення s/bf на основний критерій оцінки енергоефективності процесів термохімічної обробки палива (коефіцієнт \bar{H}_U) проводились для метану, природного газу та попутного газу чотирьох різних складів. Запропонований алгоритм дослідження полягав у наступному.

Таблиця 3.9 – Результати розрахунку вмісту вуглецю в продуктах парової конверсії метану ($T_{THR} = 1100$ К, $p_{THR} = 0,1$ МПа, $s/bf = 1$)

Компонент	X_m – мольна частка	MW – молекулярна вага	n – кількість атомів вуглецю в компоненті	AW_{Carbon} – атомна вага вуглецю	$n \times AW_{Carbon} \times X_m$	$X_m \times MW$
CO	0,235000	28,0101	1	12,011	2,827211	6,593162
CO ₂	0,002313	44,0095	1	12,011	0,027781	0,101792
CH ₄	0,039739	16,0425	1	12,011	0,477961	0,638389
H ₂ O	0,007099	18,0153	0	12,011	0	0,127895
H ₂	0,715408	1,0079	0	12,011	0	0,721060
Всього	1,000000					
Сума ($n \times AW_{Carbon} \times X_m$)					3,332953	
Сума ($X_m \times MW$)						8,182297
CC (вміст вуглецю)						0,4073

Рисунок 3.20 – Вплив визначальних параметрів T_{THR} , p_{THR} , s/bf на вміст вуглецю CC_{Syngas} в продуктах парової конверсії метану:



1 – 0,1 МПа, $s/bf = 8$; 2 – 0,1 МПа, $s/bf = 1$; 3 – 1,0 МПа, $s/bf = 1$;
4 – 1,0 МПа, $s/bf = 8$; 5 – 2,0 МПа, $s/bf = 1$; 6 – 2,0 МПа, $s/bf = 8$; 7 – CH₄

Таблиця 3.10 – Зміна вмісту вуглецю по відношенню до базового палива при термохімічній обробці метану в діапазоні температур 500–1100 К

Характеристики вмісту вуглецю	Параметри процесу конверсії					
	p_{THR} , МПа					
	0,1		1,0		2,0	
	T_{THR} , К					
	500	1100	500	1100	500	1100
$s/bf = 1$						
Вміст вуглецю CC	0,7138	0,4073	0,7404	0,4620	0,7430	0,4916
Зменшення CC , %	4,8	45,7	1,3	38,4	0,9	34,5
$s/bf = 8$						
Вміст вуглецю CC	0,6700	0,2694	0,7224	0,2911	0,7300	0,2957
Зменшення CC , %	10,7	64,1	3,7	61,2	2,7	60,6

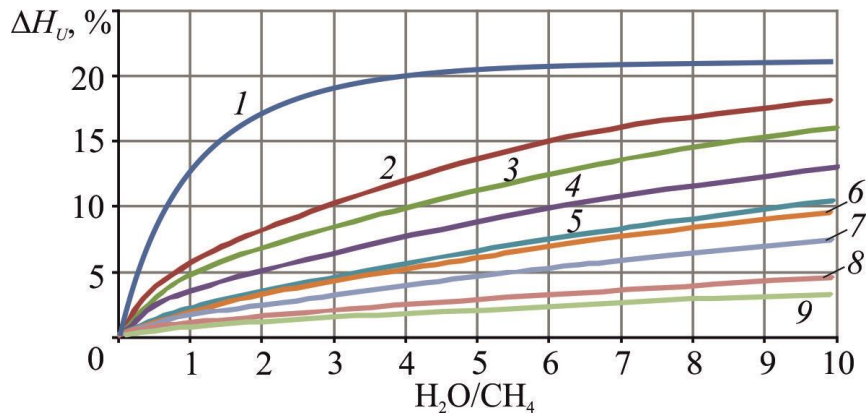


Рисунок 3.21 – Залежності коефіцієнта збільшення теплоти згорання від параметрів T_{THR} , p_{THR} , s/bf при термохімічній обробці метану:

1 – $p = 0,1$ МПа, $T = 900$ К; 2 – $p = 0,1$ МПа, $T = 800$ К; 3 – $p = 1,0$ МПа, $T = 900$ К; 4 – $p = 2,0$ МПа, $T = 900$ К; 5 – $p = 0,1$ МПа, $T = 700$ К; 6 – $p = 1,0$ МПа, $T = 800$ К; 7 – $p = 2,0$ МПа, $T = 800$ К; 8 – $p = 1,0$ МПа, $T = 700$ К; 9 – $p = 2,0$ МПа, $T = 700$ К

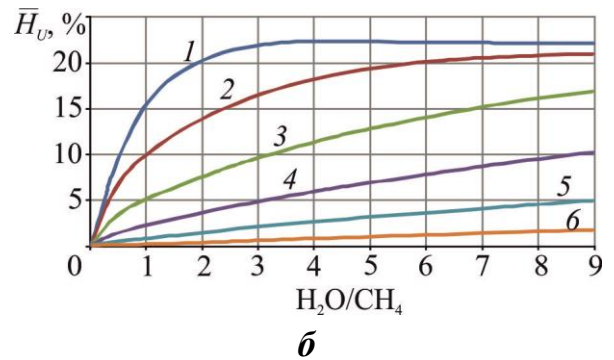
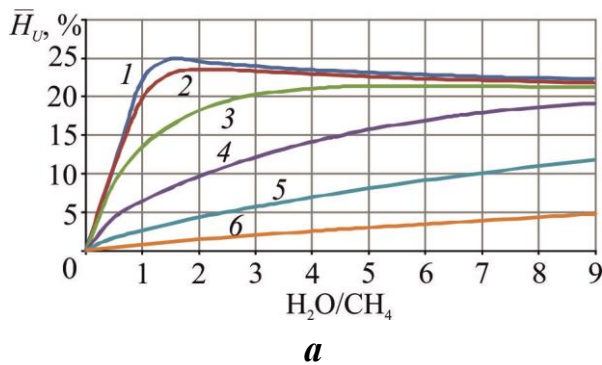
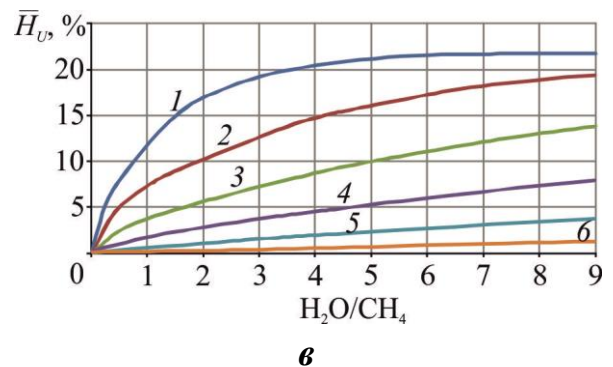


Рисунок 3.22 – Залежності коефіцієнту збільшення теплоти згорання від параметрів T_{THR} , p_{THR} , s/bf при термохімічній обробці природного газу:

а – $p_{THR} = 0,1$ МПа; **б** – $p_{THR} = 1,0$ МПа;
в – $p_{THR} = 2,0$ МПа;

1 – $T_{THR} = 1123$ К; 2 – $T_{THR} = 1023$ К;
3 – $T_{THR} = 923$ К; 4 – $T_{THR} = 823$ К;
5 – $T_{THR} = 723$ К; 6 – $T_{THR} = 623$ К



Для фіксованих значень тиску процесу термохімічної обробки p_{THR} проводився розрахунок складу продуктів термохімічної обробки з подальшим розрахунком теплоти згорання H_U та визначенням коефіцієнта збільшення теплоти

згоряння \bar{H}_U як функції від температури T_{THR} та відношення s/bf :

$$\begin{cases} \bar{H}_{U_{1...l}}^1 = f(T_{THR_{1...m}}, s/bf_{1...n}), p_{THR_1} = const 1 \\ \bar{H}_{U_{1...l}}^2 = f(T_{THR_{1...m}}, s/bf_{1...n}), p_{THR_1} = const 2 \\ \bar{H}_{U_{1...l}}^3 = f(T_{THR_{1...m}}, s/bf_{1...n}), p_{THR_1} = const 3, \\ \dots \\ \bar{H}_{U_{1...l}}^k = f(T_{THR_{1...m}}, s/bf_{1...n}), p_{THR_1} = const k \end{cases} \quad (3.31)$$

де k – кількість фіксованих значень тиску; m – кількість фіксованих значень температури; n – кількість фіксованих значень відношення s/bf ; $l = m \cdot n$ – кількість розрахункових значень \bar{H}_U .

Діапазон тисків 0,1 – 2,0 МПа ($k = 4$, ряд фіксованих значень – 0,1 МПа; 0,6 МПа; 1,0 МПа; 2,0 МПа). Для кожного значення тиску розрахунок проводився для діапазону температур 623–1123 К ($m = 6$, ряд фіксованих значень – 623 К; 723 К; 823 К; 923 К; 1023 К, 1123 К). Для кожного значення температури розрахунок проводився для діапазону значень відношення пара/паливо 0 – 9 ($n = 19$, ряд фіксованих значень – 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0).

Для кожного варіанту палива виконано $k \times m \times n = 4 \times 6 \times 19 = 456$ обчислень \bar{H}_U .

Узагальнення впливу відношення s/bf на приріст теплоти згоряння в умовах варіювання параметра $T_{THR} = \text{var}$ і фіксованого значення $p_{THR} = \text{const}$ дозволило параметрично представити результати у вигляді графічних залежностей, представлених на рис. 3.23.

Для кожного фіксованого значення тиску при фіксованому значенні температури і змінному значенні відношення пара/паливо визначався локальний максимум \bar{H}_U^R , якому відповідає певне раціональне значення параметру s/bf^R (рис. 3.24).

Математичний опис представлений у вигляді системи рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{H}^{R_{623}}_{U_1} = f(s/bf^{R_{623}}), \quad p_{THR_1} = const \ 1 \\ \bar{H}^{R_{1123}}_{U_1} = f(s/bf^{R_{1123}}), \quad p_{THR_1} = const \ 1 \\ \bar{H}^{R_{623}}_{U_2} = f(s/bf^{R_{623}}), \quad p_{THR_2} = const \ 2 \\ \bar{H}^{R_{1123}}_{U_2} = f(s/bf^{R_{1123}}), \quad p_{THR_2} = const \ 2 \\ \bar{H}^{R_{623}}_{U_3} = f(s/bf^{R_{623}}), \quad p_{THR_3} = const \ 3 \\ \bar{H}^{R_{1123}}_{U_3} = f(s/bf^{R_{1123}}), \quad p_{THR_3} = const \ 3 \\ \bar{H}^{R_{623}}_{U_4} = f(s/bf^{R_{623}}), \quad p_{THR_4} = const \ 4 \\ \bar{H}^{R_{1123}}_{U_4} = f(s/bf^{R_{1123}}), \quad p_{THR_4} = const \ 4 \end{array} \right. \quad (3.32)$$

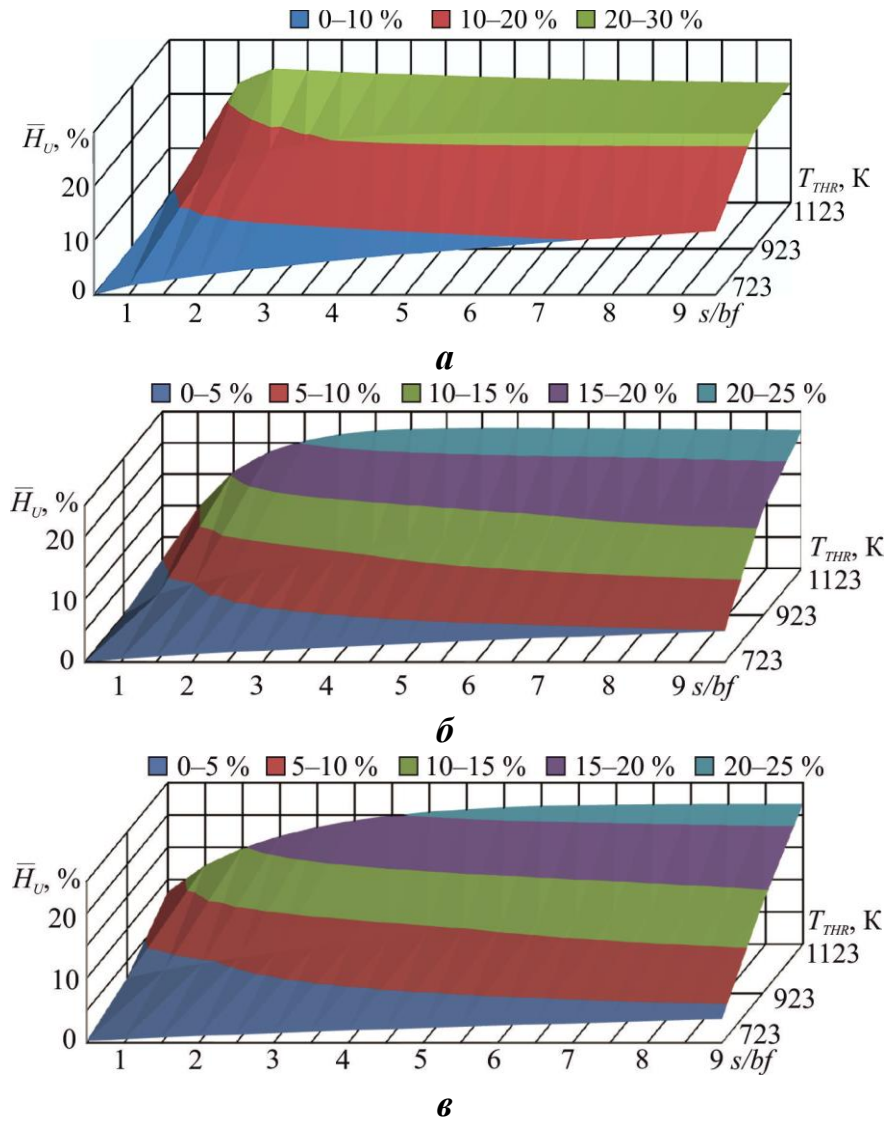
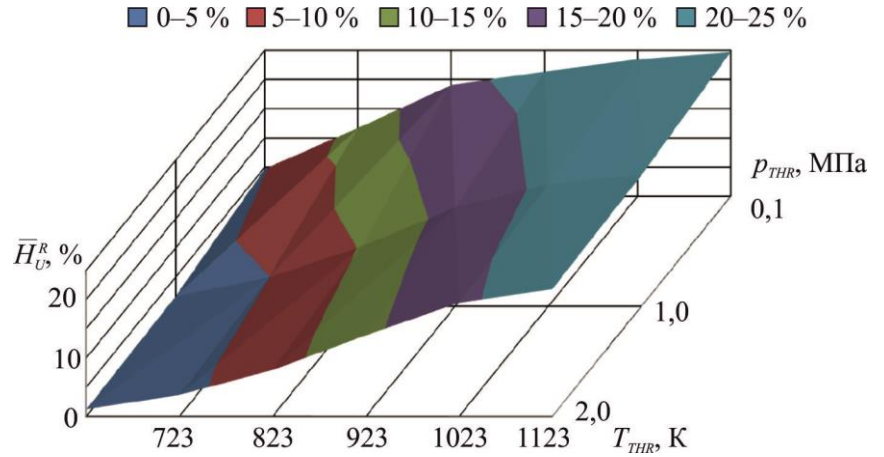


Рисунок 3.23 – Параметрична залежність $\bar{H}_u = f(T_{THR}, s/bf)$ для термохімічної обробки природного газу при p_{THR} :

a – 0,1 МПа; **б** – 1,0 МПа; **в** – 2,0 МПа

Рисунок 3.24 –
Параметрична
залежність
 $\bar{H}_U^R = f(T_{THR}, p_{THR}, s/bf^R)$
для термохімічної
обробки природного
газу



Отримане значення \bar{H}_U^R є максимально досяжним значенням коефіцієнта збільшення теплоти згоряння.

Для кожного фіксованого значення тиску визначалась регресійна залежність максимально досяжного значення коефіцієнта збільшення теплоти згоряння від температури як поліноміальна функція:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{H}_{U_1}^R = c_{11} \cdot T_{THR}^4 - c_{21} \cdot T_{THR}^3 + c_{31} \cdot T_{THR}^2 - c_{41} \cdot T_{THR} + d_1, \\ \quad p_{THR_1} = const 1; \\ \bar{H}_{U_2}^R = c_{12} \cdot T_{THR}^4 - c_{22} \cdot T_{THR}^3 + c_{32} \cdot T_{THR}^2 - c_{42} \cdot T_{THR} + d_2, \\ \quad p_{THR_2} = const 2; \\ \dots \\ \bar{H}_{U_n}^R = c_{1n} \cdot T_{THR}^4 - c_{2n} \cdot T_{THR}^3 + c_{3n} \cdot T_{THR}^2 - c_{4n} \cdot T_{THR} + d_n, \\ \quad p_{THR_n} = const n. \end{array} \right. \quad (3.33)$$

Методами регресійного аналізу встановлено залежність коефіцієнтів поліноміальної функції $\bar{H}_U^R = f(T_{THR}, p_{THR})$ від тиску:

$$\bar{H}_U^R = a_1 \cdot T_{THR}^4 - a_2 \cdot T_{THR}^3 + a_3 \cdot T_{THR}^2 - a_4 \cdot T_{THR} + b, \quad (3.34)$$

де $a_1 = -A_{11} \cdot p_{THR}^2 - A_{22} \cdot p_{THR} + B_1$; $a_2 = -A_{21} \cdot p_{THR}^2 - A_{22} \cdot p_{THR} + B_2$;

$a_3 = -A_{31} \cdot p_{THR}^2 - A_{32} \cdot p_{THR} + B_3$; $a_4 = -A_{41} \cdot p_{THR}^2 - A_{42} \cdot p_{THR} + B_4$;

$b = -A_b \cdot p_{THR}^2 - A_b \cdot p_{THR} + B_b$.

Отримані регресійні залежності надають можливість розрахунку максимально досяжного коефіцієнта збільшення теплоти згоряння для температури та тиску в межах заданих їх діапазонів при раціональному значенні параметра s/bf^R (рис. 3.24).

Проведене моделювання дозволило встановити температурний діапазон ефективної конверсії природного газу, оцінити вплив тиску процесу на ступінь конверсії, виявити допустимий діапазон відношення пара / газ, який склав 6–7 кг/кг.

Дослідження процесів термохімічної обробки попутного газу

Компонентний склад попутного газу широко варіюється в залежності від міста видобутку і містить важкі вуглеводні. У табл. 3.11 надані різні варіанти компонентного складу попутного газу: T1 [29], T2 [30], T3 [31], T4 [32], T5 [33].

Дослідження впливу основних параметрів процесу конверсії попутного газу різного складу на приріст теплоти згоряння проводилося аналогічно підходам, застосованим при дослідженні конверсії природного газу і викладеним у п. 3.7.2.

Деякі результати дослідження парової некаталітичної конверсії попутного газу різного складу (див. табл. 3.11, варіанти T1, T2, T4) представлено на рис. 3.25–3.30. Підтверджено, що при термохімічній обробці попутного газу шляхом парової конверсії відбувається перетворення більш важких вуглеводнів в метан і компоненти синтез-газу.

Таблиця. 3.11 – Компонентний склад попутного газу

Параметр	Варіант				
	T1	T2	T3	T4	T5
1. Склад (% за об'ємом)					
Метан (CH ₄)	68,00	62,77	73,7	64,48	67,32
Етан (C ₂ H ₆)	15,00	15,07	6,70	11,98	17,66
Пропан (C ₃ H ₈)	9,00	6,64	6,10	8,75	8,95
Бутан (C ₄ H ₁₀)	5,00	2,40	3,89	3,84	4,20
Пентан та вищі (C ₅ +)	1,00	1,12	3,70	2,02	1,87
Сірководень (H ₂ S)	–	2,80	0,20	0,57	–
Діоксид вуглецю (CO ₂)	1,00	9,20	1,34	0,63	–
Азот (N ₂)	1,00	–	4,37	3,73	–
Водяна пара (H ₂ O)	–	–	–	4,00	–
2. Нижча теплота згоряння (LCV), МДж/кг	46,3	38,6	44,0	42,9	47,9

Проведені дослідження дозволили встановити температурний діапазон ефективної конверсії попутного газу різного складу, оцінити вплив тиску

процесу на ефективність конверсії, виявити допустимий діапазон відношення пара / газ, який склав 6–7 кг/кг.

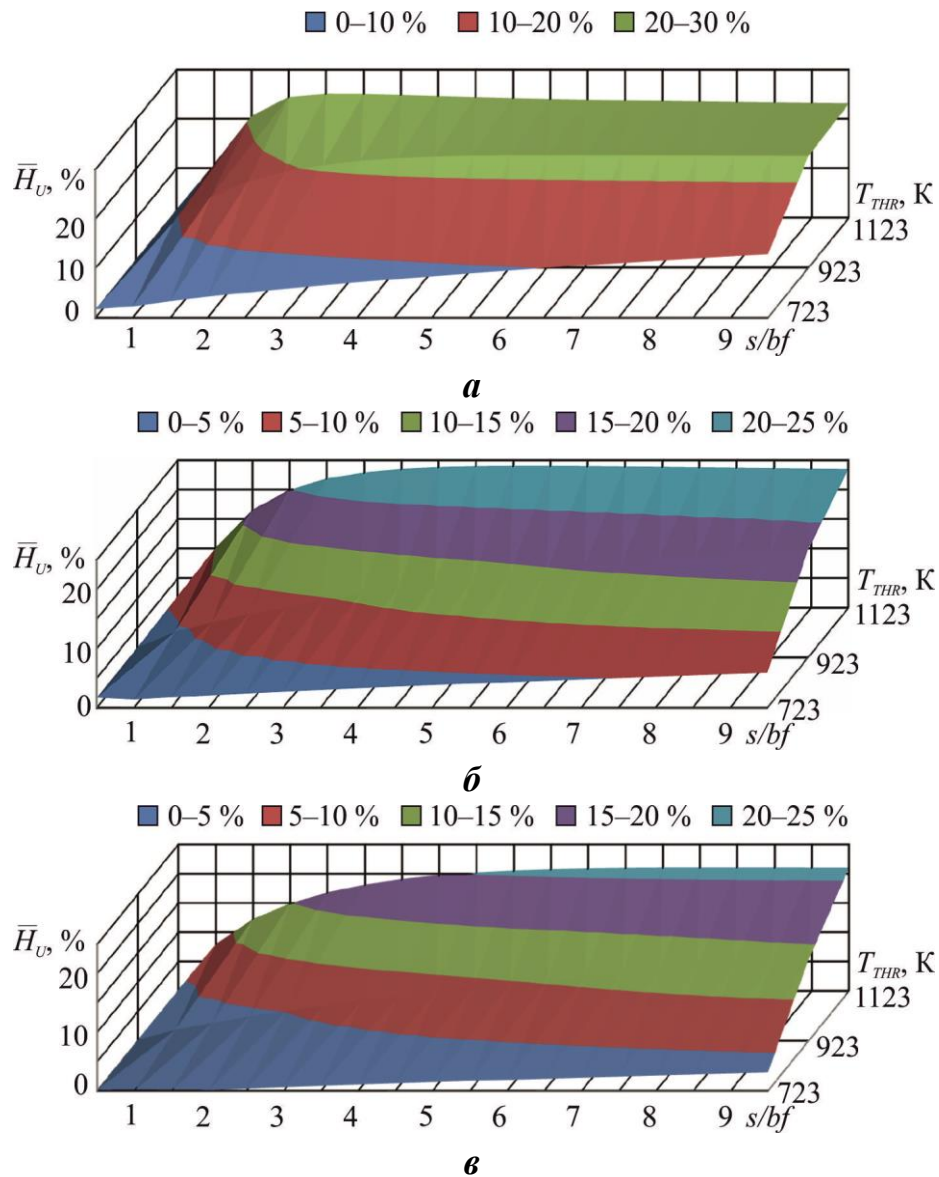


Рисунок 3.25 – Параметрична залежність $\bar{H}_u = f(T_{THR}, s/bf)$ для термохімічної обробки попутного газу складу Т1 при тиску процесу p_{THR} :

a – 0,1 МПа; **б** – 1,0 МПа; **в** – 2,0 МПа

Рисунок 3.26 –
Параметрична
залежність
 $\bar{H}_U^R = f(T_{THR}, p_{THR}, s/bf^R)$
для термохімічної
обробки попутного
газу складу Т1

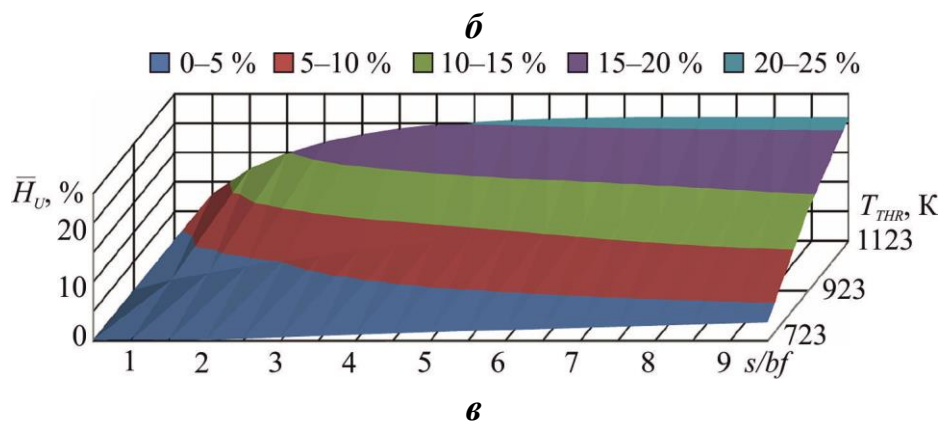
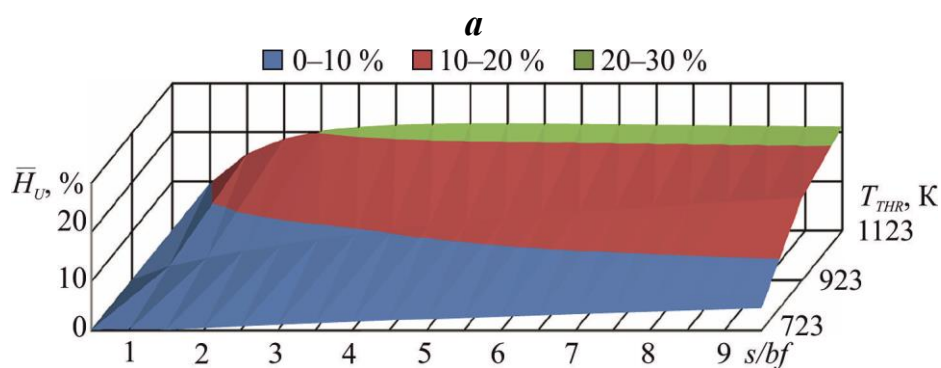
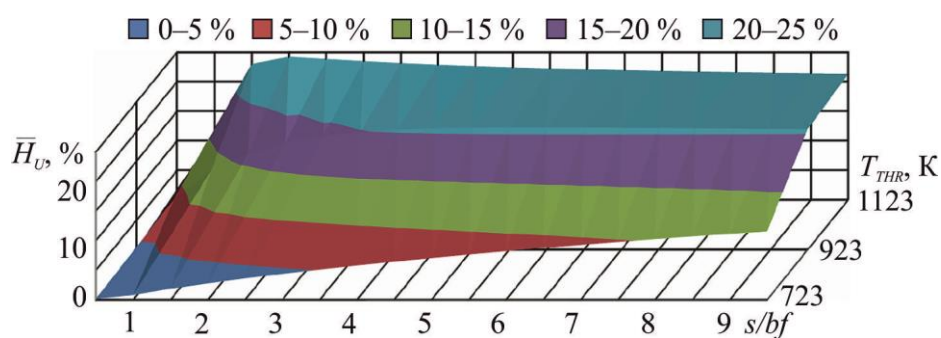
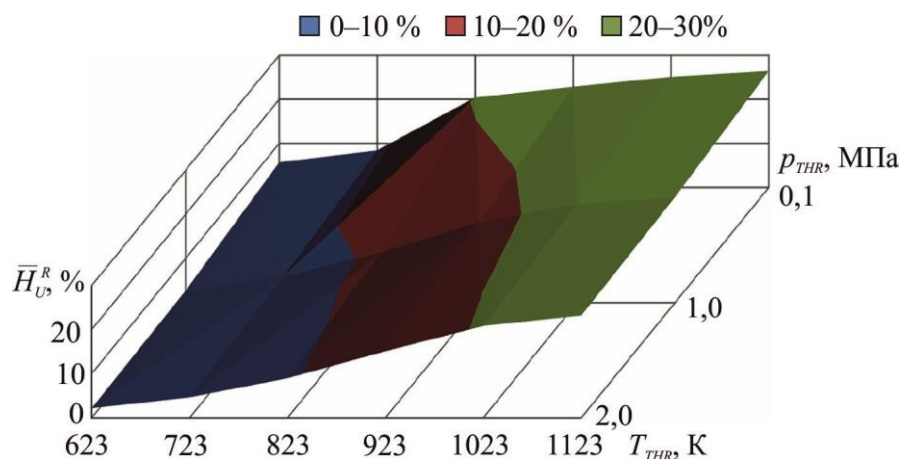


Рисунок 3.27 – Параметрична залежність $\bar{H}_v = f(T_{THR}, s/bf)$ для термохімічної
обробки попутного газу складу Т2 при тиску процесу p_{THR} :
 \mathbf{a} – 0,1 МПа; $\mathbf{б}$ – 1,0 МПа; $\mathbf{в}$ – 2,0 МПа

Рисунок 3.28 –
Параметрична
залежність
 $\bar{H}_U^R = f(T_{THR}, p_{THR}, s/bf^R)$
для термохімічної
обробки попутного
газу складу Т2

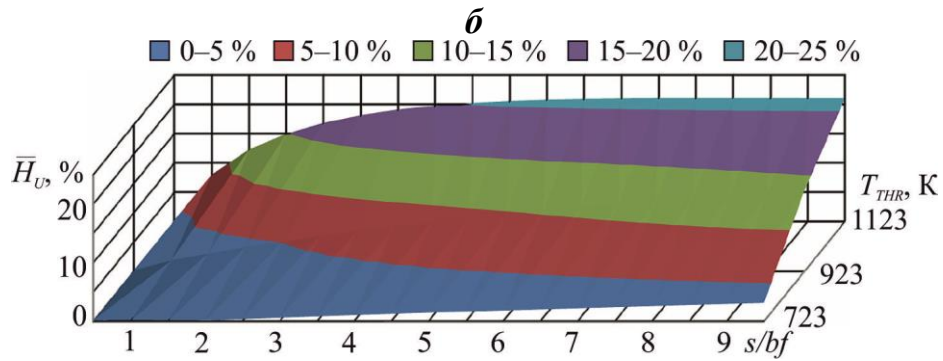
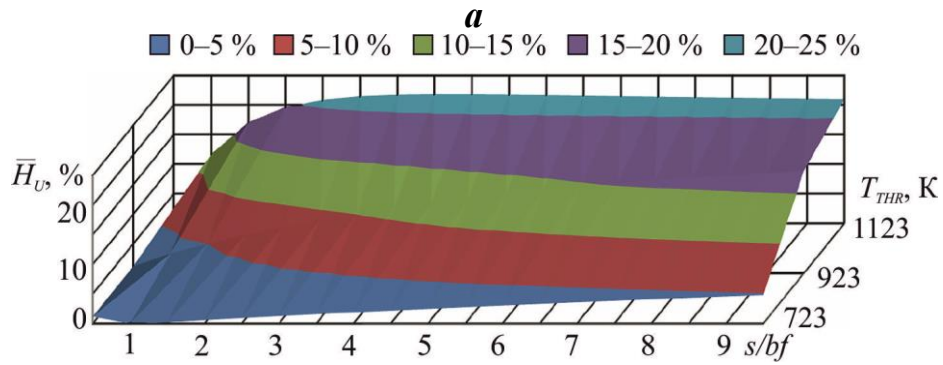
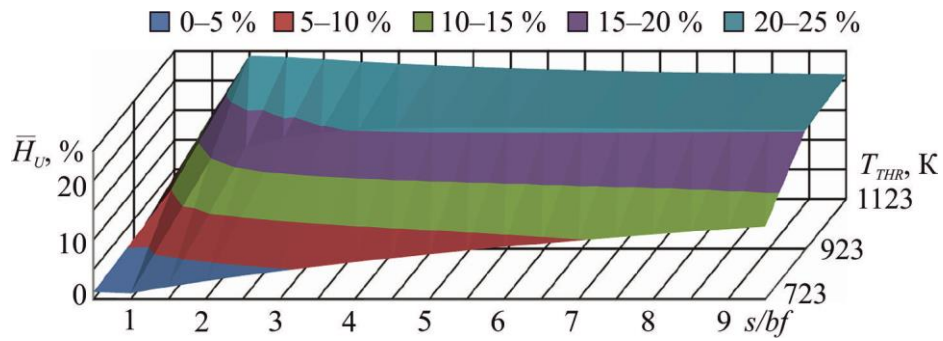
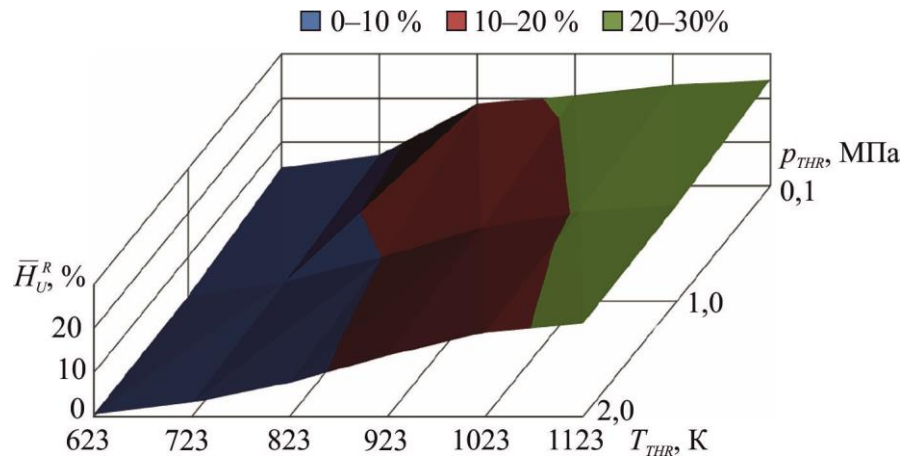
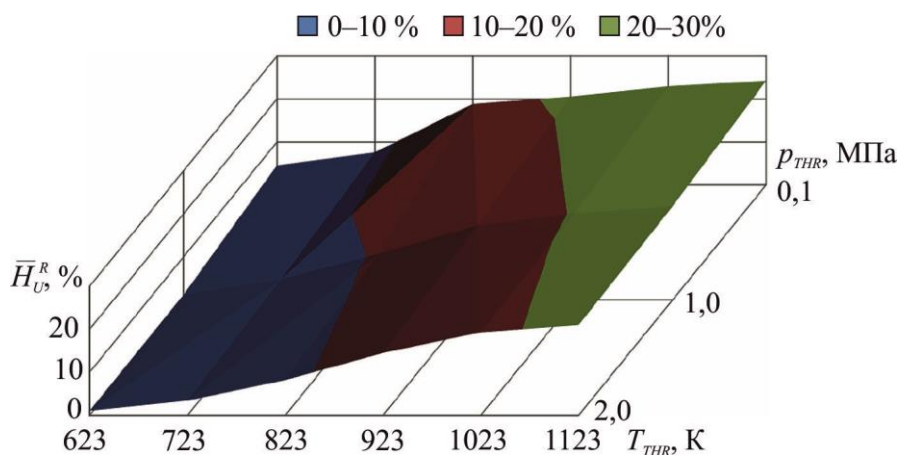


Рисунок 3.29 – залежність $\bar{H}_U = f(T_{THR}, s/bf)$ для термохімічної обробки попутного газу складу Т4 при тиску процесу p_{THR} :
 a – 0,1 МПа; b – 1,0 МПа; v – 2,0 МПа

Рисунок 3.30 –
Параметрична
залежність
 $\bar{H}_U^R = f(T_{THR}, p_{THR}, s / bf^R)$
для термохімічної
обробки попутного
газу складу Т4



Дослідження процесів парової конверсії метанолу та етанолу.

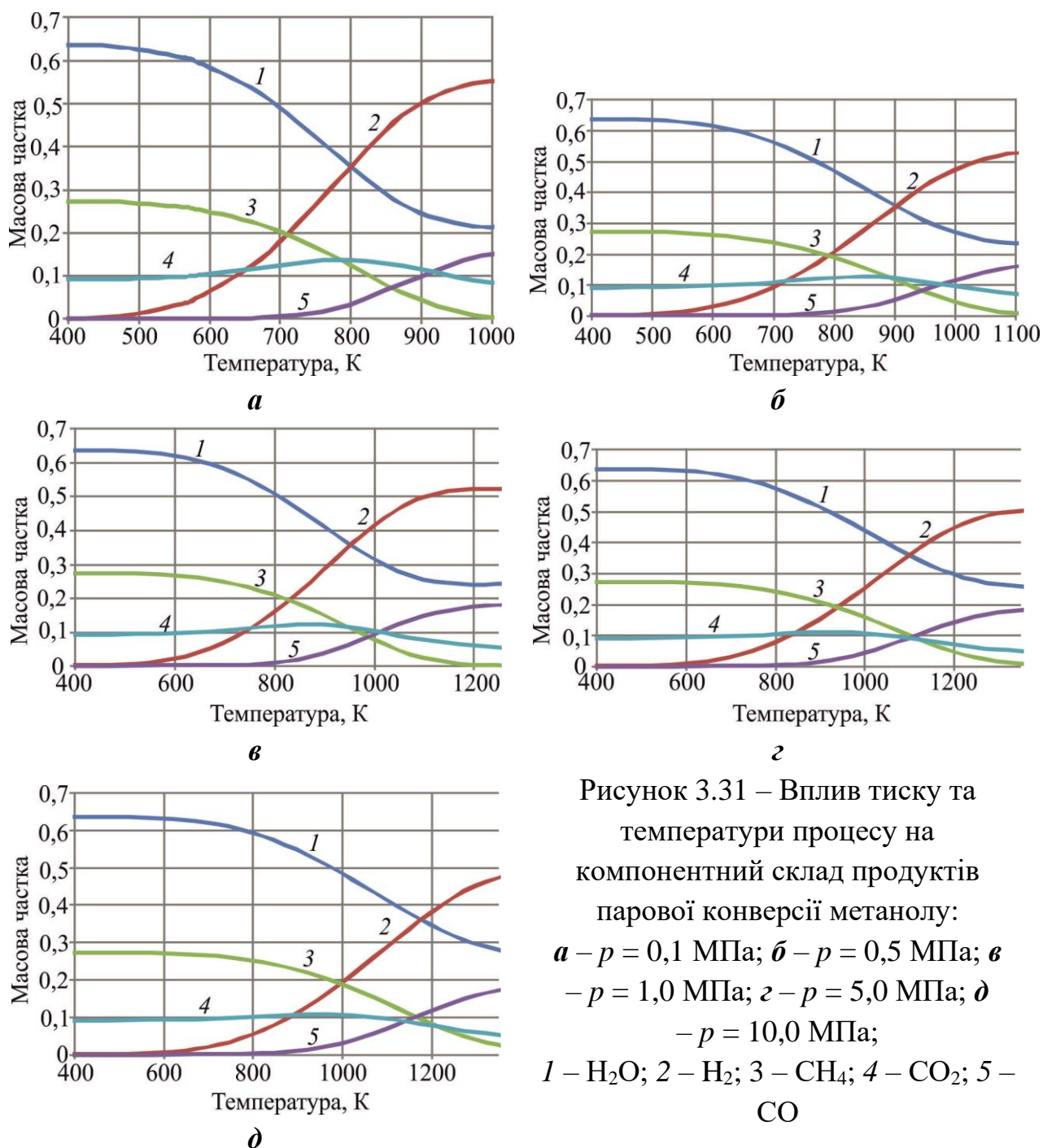
Результати моделювання процесів парової конверсії метанолу та етанолу в реакторі на основі методу мінімізації вільної енергії Гіббса представлено досить широко [125, 140–143]. Встановлено, що в діапазоні температур 573–623 К відбувається повна конверсія метанолу. При подальшому підвищенні температури виходи H_2 та CO знижуються. При збільшенні відношення пара / метанол вище оптимального вихід H_2 і CO також зменшується. В роботі [141] проведено порівняння результатів математичного моделювання процесів в реакторі з експериментальними даними і запропоновано ввести коригувальні функції, що враховують умови проведення нерівноважного риформінгу і вплив каталізатора. Згідно з рекомендаціями [142] при паровій конверсії метанолу максимальна енергетична ефективність може бути досягнута в діапазоні температур реакції 570–580 К в умовах атмосферного тиску.

З метою уточнення впливу тиску процесу на ефективність конверсії проведено математичне моделювання процесів парової конверсії метанолу при підвищеному тиску в діапазоні 0,1–10 МПа (рис. 3.31).

Аналогічне дослідження процесів термохімічної обробки етанолу проведено в діапазонах відношення пара / етанол - 0,6 – 1,8 та температур 700–1200 К при тиску 0,1–5,0 МПа (рис. 3.32–3.34).

Моделювання процесів парової конверсії метанолу та етанолу виявило, що зростання тиску процесу приводить до зміщення області ефективності в зону високих температур. Для процесів парової конверсії метанолу та етанолу при

тиску 0,1–0,5 МПа це збігається з результатами досліджень інших авторів [125]. Аналіз впливу тиску на ефективність термохімічної обробки метанолу та етанолу в діапазоні більш 0,5 МПа виконано вперше. Виявлено ефективний діапазон відношення вода / спирт, який склав 0,6 – 0,9 кг/кг. Встановлено, що для діапазону температур 573–623 К максимальний приріст теплоти згоряння спиртових палив складає 18–22 %.



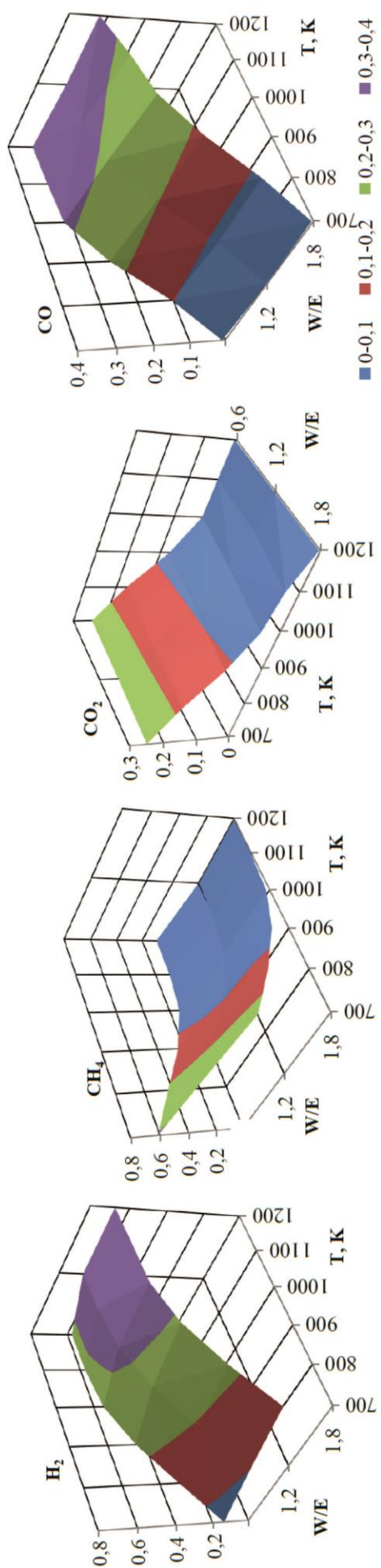


Рисунок 3.32 – Вплив тиску та температури процесу на компонентний склад продуктів парової конверсії етанолу – $p = 0,1$ МПа

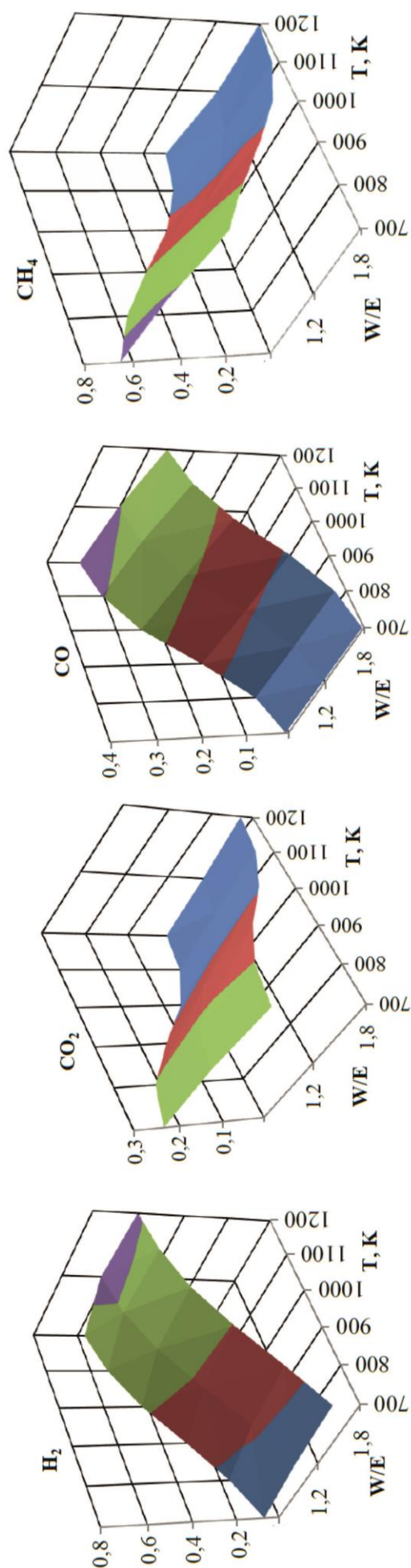


Рисунок 3.33 – Вплив тиску та температури процесу на компонентний склад продуктів парової конверсії етанолу – $p = 1,0$ МПа

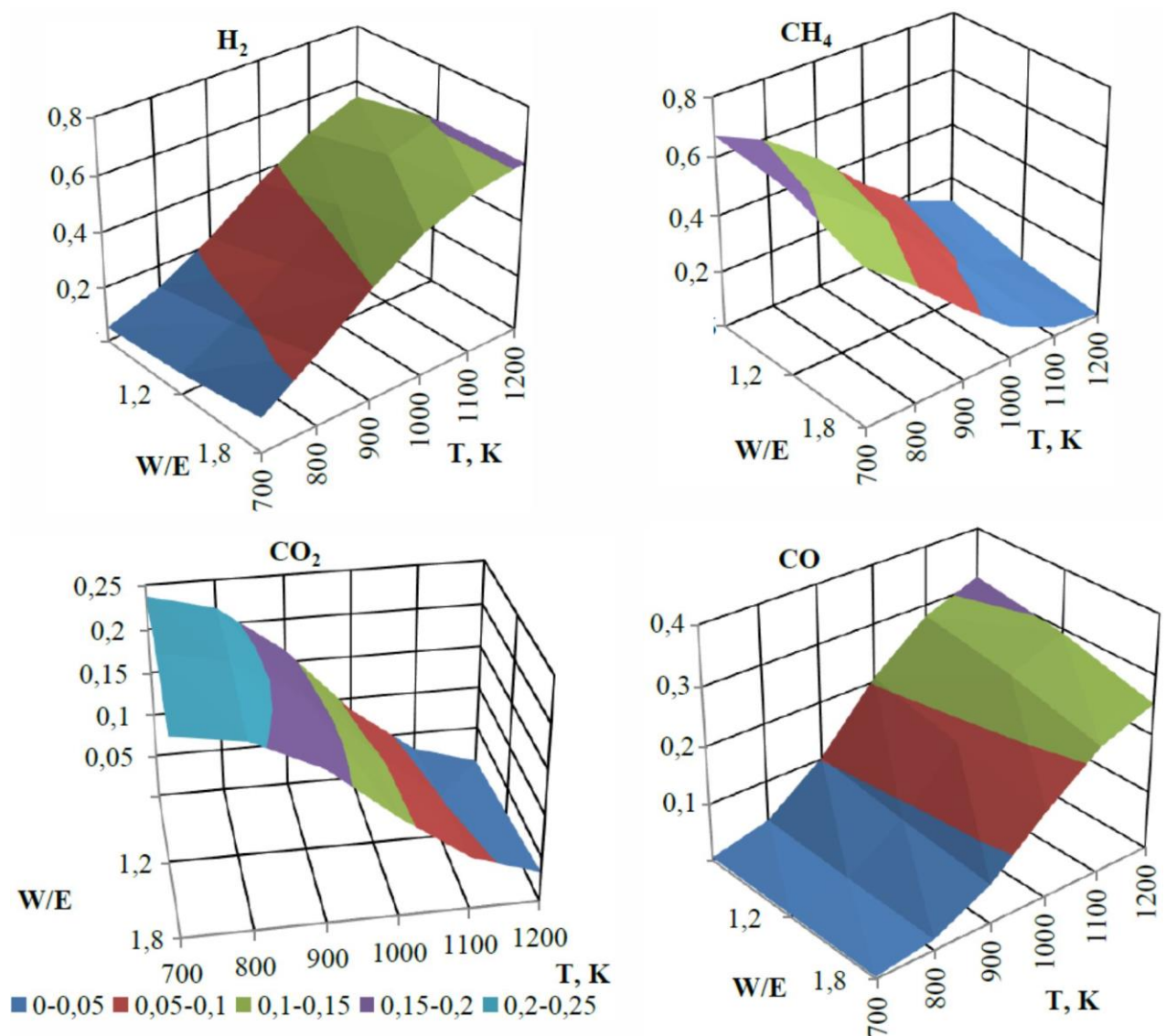


Рисунок 3.34 – Вплив тиску та температури процесу на компонентний склад продуктів парової конверсії етанолу: $p = 5,0$ МПа

Для оцінки ефективності застосування термохімічної обробки палива можливо використання залежностей (3.17)–(3.22), які дозволяють у першому наближенні визначити збільшення теплоти згоряння базового палива у вигляді (3.16) для наявного діапазону температур.

Витрати теплоти відпрацьованих газів, які необхідні для здійснення конверсії палива, визначаються тепловим балансом термохімічного реактора:

$$\frac{\bar{H}_U H_U^B C_N Ne}{3600} = \Delta T G_G c_P, \quad (3.33)$$

де C_N – питома витрата базового палива; Ne – потужність на вихідному валу

двигуна; G_G – витрата відпрацьованих газів; c_p – середня масова ізобарна теплоємність відпрацьованих газів у відповідному температурному діапазоні; $\Delta T = f(G_G, c_p, \bar{H}_U)$ – перепад температури відпрацьованих газів, який необхідний для здійснення конверсії палива.

Максимальна допустима температура ендотермічної реакції конверсії палива T_{THR} визначається як:

$$T_{THR} = T_4 - \Delta T, \quad (3.34)$$

де T_4 – температура відпрацьованих газів теплового двигуна.

Зіставлення результатів розрахунку за рівняннями (3.17)–(3.22) та аналіз потенціалів скидної теплоти відпрацьованих газів енергетичних модулів на базі DF/D2S, DF/D4S та DF/GTE дозволяє зробити наступні висновки:

- температурний потенціал скидної теплоти енергомодулів DF/D2S/D не дозволяє ефективно здійснювати термохімічну обробку вуглеводневих палив, перспективним є застосування термохімічної технології перетворення енергії в металогідридних утилізаційних установках;
- рівень температур вторинних енергоресурсів енергомодулів DF/D4S/E на базі сучасних СОД надає можливість задовільній конверсії метанолу, помірній конверсії етанолу, але не дозволяє ефективно здійснювати конверсію інших вуглеводневих палив;
- для наявного температурного діапазону відпрацьованих газів енергомодулів DF/GTE/E на базі сучасних серійних ГТД можлива помірна конверсія метану, природного та попутного газу, бутану, пропану, етану, а також ефективна конверсія метанолу, етанолу.

Необхідним є подальші дослідження характеристик суднових енергетичних модулів з застосуванням термохімічних технологій різних структурно-функціональних схем.

3.4 Експериментальні дослідження закономірностей процесів в елементах систем термохімічної обробки палива шляхом утилізації скидної теплоти

3.4.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є визначення енергетичної ефективності процесів термохімічної обробки палива при тиску, який відповідає умовам підведення паливного газу до теплових двигунів.

В якості основних критеріїв оцінки енергоефективності процесів термохімічної обробки вуглеводневих палив запропоновано використовувати:

- коефіцієнт збільшення теплоти згоряння базового палива;
- коефіцієнт використання енергії, яка потрібна для організації процесу термохімічної обробки базового палива.

Коефіцієнт збільшення теплоти згоряння палива (етанолу) знаходиться за залежністю (3.23) та являє собою (для параметрів, що визначаються в ході експериментів) наступне відношення

$$\overline{H}_U = \frac{\Delta H_{USG}}{H_{UB}}, \quad (3.35)$$

де $\Delta H_U = H_{USG} - H_{UB}$ - зміна нижчої теплотворної здатності продуктів термохімічної обробки (синтез-газу) H_{USG} (кДж/кг) по відношенню до теплотворної здатності етанолу H_{UB} (кДж/кг).

В процесі експериментальних досліджень даний критерій може бути визначений як відношення приросту теплової потужності ΔQ_{THR} до теплової потужності Q_B , яка відповідає спалюванню базового етанолу. Приріст теплової потужності ΔQ_{THR} визначається як різниця між тепловою потужністю Q_{SG} , яка відповідає спалюванню синтез-газу, отриманому в результаті парової конверсії, та тепловою потужністю базового палива Q_B :

$$\overline{H}_U = \frac{\Delta Q_{THR}}{Q_B} = \frac{(Q_{SG} - Q_B)}{Q_B} = \frac{(G_{SG} \cdot H_{USG} - G_B \cdot H_{UB})}{G_B \cdot H_{UB}}, \quad (3.36)$$

де G_{SG} – витрата дегідрованого синтез-газу, кг/с; G_B – витрата етанолу, кг/с.

Коефіцієнт використання теплової енергії, яка потрібна для організації процесу термохімічної обробки базового палива, може бути визначений як відношення приросту теплової потужності ΔQ_{TCR} до теплової потужності Q_{H} , яка підводиться до реактору:

$$Q' = \frac{\Delta Q_{\text{TCR}}}{Q_{\text{H}}} . \quad (3.37)$$

Теплова потужність Q_{H} враховує витрати теплоти на нагрів суміші, пароутворення, організацію ендотермічних реакцій та втрати теплоти через стінки та за рахунок конвекції.

Сумарний коефіцієнт використання енергії враховує сумарні витрати енергії на організацію процесу термохімічної обробки палива ΣQ_{TCR}

$$\bar{Q} = \frac{\Delta Q_{\text{TCR}}}{\Sigma Q_{\text{TCR}}} . \quad (3.38)$$

Сумарні витрати енергії на організацію процесу термохімічної обробки палива визначаються як сума витрат теплової енергії Q_{H} та витрат механічної енергії Q_{COM} на стискування охолодженого та дегідрованого синтез-газу від тиску в реакторі до тиску, який відповідає умовам підведення паливного газу до теплового двигуна:

$$\Sigma Q_{\text{TCR}} = Q_{\text{H}} + Q_{\text{COM}} . \quad (3.39)$$

При експериментальних дослідженнях розглядались умови підведення паливного газу до чотирьохтактного ДВЗ, що відповідає тиску 0,7 МПа.

Експериментальні дослідження передбачали проведення комплексного аналізу впливу параметрів процесу термохімічної обробки базового палива на ефективність парової конверсії. За результатами теоретичних досліджень процесів термохімічної обробки вуглеводневих палив шляхом парової конверсії в якості основних параметрів процесу визначено наступні фактори:

- відношення масових витрат вода (пара)/базове паливо s / bf ;
- тиск процесу p_{THR} ;
- температура процесу T_{THR} .

Параметром оптимізації є коефіцієнт збільшення теплоти згоряння базового

палива:

$$\bar{H}_U = f\left(T_{THR}, p_{THR}, \frac{s}{bf}\right). \quad (3.40)$$

В діапазоні варіювання параметрів оптимізації коефіцієнт збільшення теплоти згоряння базового палива змінюється нелінійно. Тому має сенс прийняти для регресійного аналізу квадратичну модель типу

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \quad . \quad (3.41)$$

Вибір основних рівнів та інтервалів варіювання факторів визначався за результатами проведених теоретичних досліджень та обмежувався фізичними можливостями стенду та лабораторного устаткування в цілому. Фактори та рівні їх варіювання представлено в табл. 3.12.

В якості плану експерименту обрано симетричний некомпозиційний план Бокса-Бенкена. Матриця планування, яка була складена за допомогою збалансованої блок-схеми [144], наведена на рис. 3.35.

Таблиця 3.12 – Параметри та рівні варіювання

Фактор		Вода/етанол	Тиск	Температура синтез-газу на виході з реактору
Позначення		X_1	X_2	X_3
Одиниці вимірювання		(кг/с)/(кг/с)	МПа	К
Основний рівень	X_{i0}	1,5	0,275	900
Інтервали варіювання	ΔX_i	1,2	0,175	50
Верхній рівень	$X_i = +1$	2,7	0,450	950
Нижній рівень	$X_i = -1$	0,3	0,100	850

Методика проведення експериментальних досліджень на модернізованому стенді ТХР 2.0 М (див. рис. 2.5) передбачає наступну послідовність дій:

1. Після включення дозуючих насосів (1, 2) з баків (3, 4) в витратну ємність (5) подається необхідний об'єм етанолу та води. Витрата компонентів вихідної суміші вимірюється витратомірами (6, 7). Спочатку задається базовий рівень відношення вода/етанол ($X_1 = 0$).

2. Після заповнення витратної ємності (мінімум до 0,5 об'єму) включається живильний насос (8), який подає вихідну суміш в реактор

Рисунок 3.35 –
Матриця планування експерименту

X_1	X_2	X_3
± 1	± 1	0
± 1	0	± 1
0	± 1	± 1
0	0	0

(9). Температура вихідної суміші вимірюється термодатчиком (10).

3. Підведення теплоти до вихідної суміші здійснюється шляхом пропускання через реактор постійного струму від джерела живлення напругою 24–31 В. При цьому реєструється температура суміші продуктів конверсії на виході з реактора.

4. Дросельний клапан блоку підвищення тиску в реакторі налаштовується на тиск в реакторі, який відповідає базовому рівню тиску ($X_2 = 0$). Тиск в реакторі вимірюється манометром (11).

5. Шляхом баластування джерела живлення фіксується значення температури, відповідне до базового рівня температури в реакторі ($X_3 = 0$). Час витримки температури на заданому режимі має складати не менше 180 с, протягом яких зміна температури не перевищує 1 °С. Паралельно проводиться контроль відповідності тиску в реакторі заданому режиму ($X_1 = 0$).

6. Після виходу стенду на режим, що відповідає параметрам $X_1 = 0$; $X_2 = 0$; $X_3 = 0$ (табл. 3.12), фіксується значення електричної потужності, що підводиться до реактора. За допомогою підсистеми підготовки синтез-газу проводиться охолодження продуктів конверсії, відведення конденсату і стиснення синтез-газу з подальшим його закачуванням в балон зберігання. При цьому знімається значення електричної потужності, яка споживається компресором. Для подальшого хімічного аналізу фракційного складу синтез-газу відбирається зразок газу і проводиться його обробка за допомогою хроматографа NeoCHROM Class B.

Наступний режим налаштовується відповідно до табл. 3.13.

Таблиця 3.13 – Параметри налаштування стенду

	№	X_1	X_2	X_3
Режим налаштування стенду	0	0	0	0
I серія експериментів	1	1	1	0
	2	1	-1	0
	3	-1	1	0
	4	-1	-1	0
Центральний замір 1	5	0	0	0
II серія експериментів	6	1	0	1
	7	1	0	-1
	8	-1	0	1
	9	-1	0	-1
Центральний замір 2	10	0	0	0
III серія експериментів	11	0	1	1
	12	0	1	-1
	13	0	-1	1
	14	0	-1	-1
Центральний замір 3	15	0	0	0

Виконується 3 серії експериментів. Вимірювання не дублюються, оскільки центральний замір ($X_1 = 0$, $X_2 = 0$, $X_3 = 0$) проводиться тричі.

З метою верифікації результатів теоретичного дослідження компонентного складу синтез-газу, який отримано в результаті термохімічної обробки етанолу при підвищеному тиску, проведено окрему серію експериментів. Серія передбачала визначення компонентного складу продуктів конверсії етанолу в умовах фіксованого значення відношення s / bf для двох значень тиску процесу: 0,1 та 0,45 МПа.

3.4.2 Результати експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводилися в діапазонах температур навколишнього середовища 293–300 К і атмосферного тиску 101–103 кПа. В якості базового палива використовувався етанол марки А (ДСТУ ISO 1388-1:2003). Максимальна електрична потужність, що підводиться до реактору, становила 1,55 кВт, витрата етанолу змінювалась в межах 0,7–0,9 кг/год.

Результати експериментальних досліджень ефективності процесів термохімічної обробки палива при підвищеному тиску зведено в табл. 3.14.

Таблиця 3.14 – Результати експериментальних досліджень впливу параметрів процесу на компонентний склад та коефіцієнт збільшення теплоти згоряння базового палива \bar{H}_U

	Фактори та рівні їх варіювання			Експериментальні дані					Результати
№	X_1	X_2	X_3	Склад синтез-газу					Y
	s / bf	p_{THR}	T_{THR}	H ₂ O	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	\bar{H}_U
	$\frac{\text{кг/с H}_2\text{O}}{\text{кг/с C}_2\text{H}_5\text{OH}}$	МПа	К	Мольні частки					-
1	2,7	0,45	900	0,0187	0,0620	0,1988	0,0804	0,6400	0,124
2	2,7	0,1	900	0,0187	0,0842	0,1822	0,0131	0,7018	0,182
3	0,3	0,45	900	0,0187	0,1344	0,1445	0,3735	0,3288	0,036
4	0,3	0,1	900	0,0186	0,2192	0,0809	0,2153	0,4660	0,092
5	1,5	0,275	900	0,0187	0,0943	0,1746	0,1133	0,5991	0,112
6	2,7	0,275	950	0,0188	0,0957	0,1735	0,0192	0,6928	0,179
7	2,7	0,275	850	0,0187	0,0451	0,2115	0,1022	0,6225	0,107
8	0,3	0,275	950	0,0188	0,2212	0,0794	0,2309	0,4497	0,087
9	0,3	0,275	850	0,0187	0,1008	0,1698	0,4128	0,2979	0,024
10	1,5	0,275	900	0,0187	0,0943	0,1746	0,1133	0,5991	0,110
11	1,5	0,45	950	0,0188	0,1177	0,1571	0,0924	0,6140	0,129
12	1,5	0,45	850	0,0187	0,0466	0,2104	0,2349	0,4894	0,054
13	1,5	0,1	950	0,0188	0,1558	0,1284	0,0155	0,6814	0,196
14	1,5	0,1	850	0,0187	0,0834	0,1828	0,1010	0,6141	0,117
15	1,5	0,275	900	0,0187	0,0943	0,1746	0,1133	0,5991	0,111

Виконання експериментальних досліджень відповідно до обраної матриці планування надало можливість при обмеженій кількості експериментів отримати параметричні залежності $\bar{H}_U = f(T_{THR}, p_{THR})$ та $\bar{Q} = f(T_{THR}, p_{THR})$ для трьох відношень s / bf (рис. 3.36).

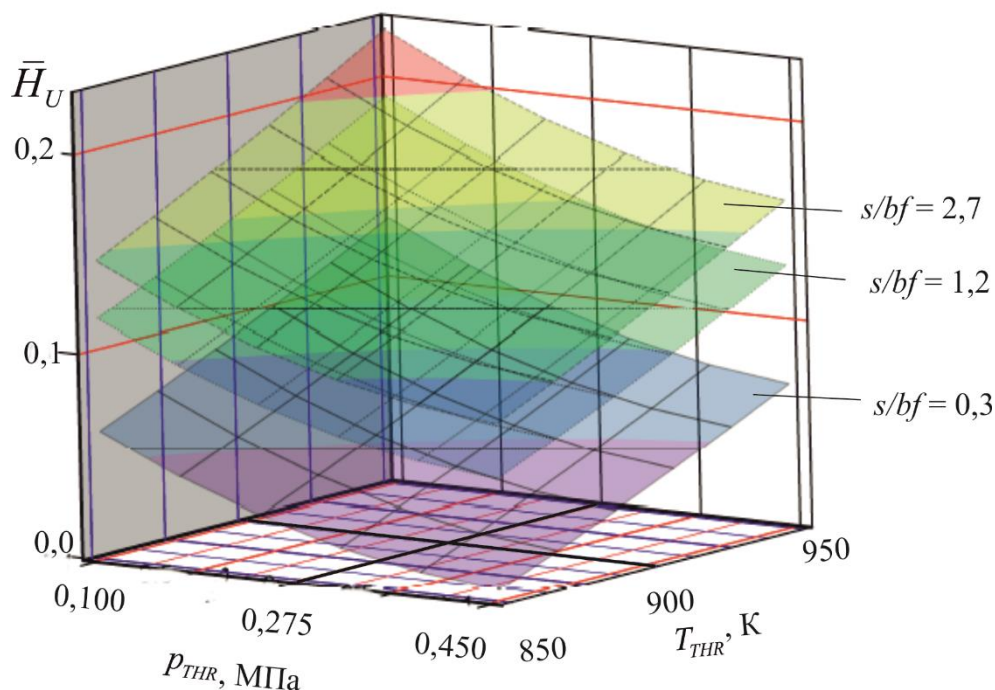


Рисунок 3.36 – Параметричні залежності $\bar{H}_U = f(T_{THR}, p_{THR}, s/bf)$

Отримані результати експериментальних досліджень залежності коефіцієнта збільшення теплоти згоряння етанолу від основних параметрів процесу (рис. 3.37) підтверджують результати теоретичних розрахунків, згідно з якими зростання тиску процесу приводить до зміщення області ефективності термохімічної обробки палива в зону більш високих температур.

Результати експериментальних досліджень впливу витрат механічної енергії на ефективність термохімічної утилізації при організації процесів термохімічної обробки палива при підвищеному тиску зведено до табл. 3.15.

Співставлення параметричних залежностей $Q' = f(T_{THR}, p_{THR})$ та $\bar{Q} = f(T_{THR}, p_{THR})$ (рис 3.38) ілюструє значний вплив витрат механічної енергії Q_{COM} на коефіцієнт використання енергії.

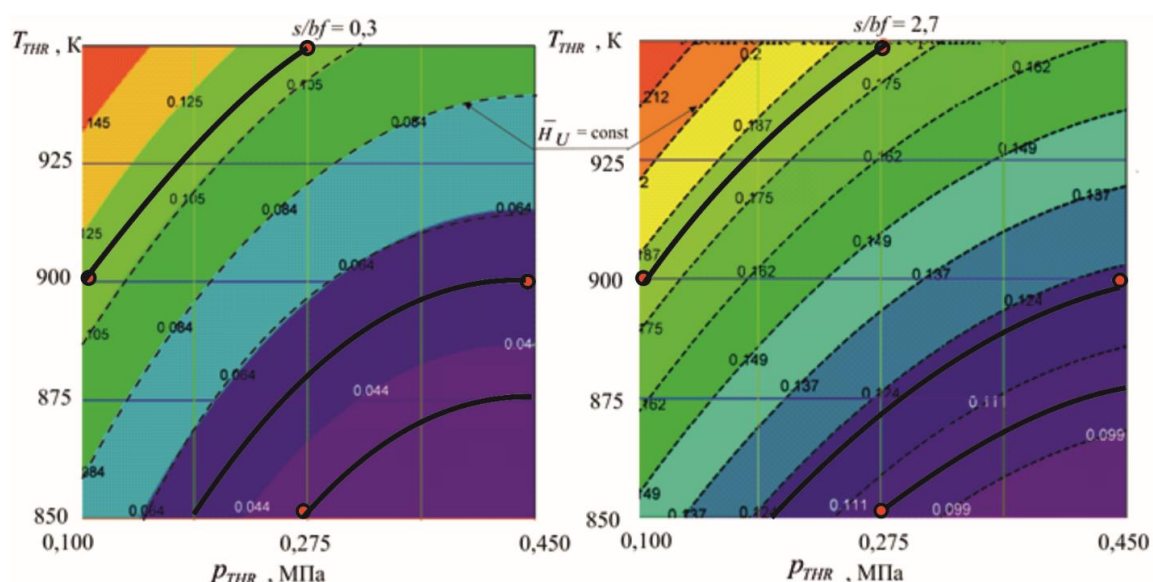


Рисунок 3.37 – Залежності $\bar{H}_U = f(T_{THR}, p_{THR})$ в умовах фіксованих значень відношення s/bf – експериментальні дані;

————— – розрахунок

Таблиця 3.15 – Результати експериментальних досліджень впливу основних параметрів процесу на складові коефіцієнта використання енергії, яка потрібна для організації процесу термохімічної обробки етанолу \bar{Q} , та на коефіцієнт використання теплової енергії Q^I

№	Фактори та рівні їх варіювання			Експериментальні дані		Результати обробки	
	X_1	X_2	X_3				
	s/bf	p_{THR}	T_{THR}	Q_H	Q_{COM}	\bar{Q}	Q^I
	$\frac{\text{кг/с H}_2\text{O}}{\text{кг/с C}_2\text{H}_5\text{OH}}$	МПа	К	Вт		-	
1	2,7	0,45	900	1385	88	0,2032	0,2136
2	2,7	0,1	900	1542	110	0,2665	0,2661
3	0,3	0,45	900	919	129	0,2357	0,2620
4	0,3	0,1	900	1331	166	0,4216	0,4310
5	1,5	0,275	900	1393	116	0,2658	0,2779
6	2,7	0,275	950	1574	106	0,2574	0,2671
7	2,7	0,275	850	1302	85	0,1866	0,1934
8	0,3	0,275	950	1338	161	0,3978	0,4238

№	Фактори та рівні їх варіювання			Експериментальні дані		Результати обробки	
	X_1	X_2	X_3				
	s / bf	p_{THR}	T_{THR}	Q_H	Q_{COM}	\bar{Q}	Q^I
	$\frac{\text{кг/с H}_2\text{O}}{\text{кг/с C}_2\text{H}_5\text{OH}}$	МПа	К	Вт		-	
9	0,3	0,275	850	784	122	0,1790	0,1937
10	1,5	0,275	900	1384	115	0,2621	0,2750
11	1,5	0,45	950	1499	121	0,2848	0,3033
12	1,5	0,45	850	1121	89	0,1590	0,1692
13	1,5	0,1	950	1761	151	0,3659	0,3652
14	1,5	0,1	850	1369	121	0,2797	0,2790
15	1,5	0,275	900	1396	88	0,2619	0,2745

Це надало можливості зробити наступні висновки:

- в залежності від параметрів процесу термохімічної обробки палива в реакторі (головним чином, від тиску p_{THR}) сумарний коефіцієнт використання енергії зменшується на 6-12 % у порівнянні з коефіцієнтом використання теплової енергії;

- витрати механічної енергії при організації процесів термохімічної обробки палива суттєво впливають на ефективність термохімічної утилізації, і їх необхідно зменшувати шляхом раціонального вибору схемних рішень енергетичної установки.

Співставлення результатів експериментальних досліджень компонентного складу синтез-газу з результатами теоретичних розрахунків дає задовільну збіжність результатів (рис 3.39), яка складає не менш 92 %, що підтверджує адекватність отриманих регресійних залежностей $\bar{H}_U = f(T_{THR}, p_{THR}, s / bf)$.

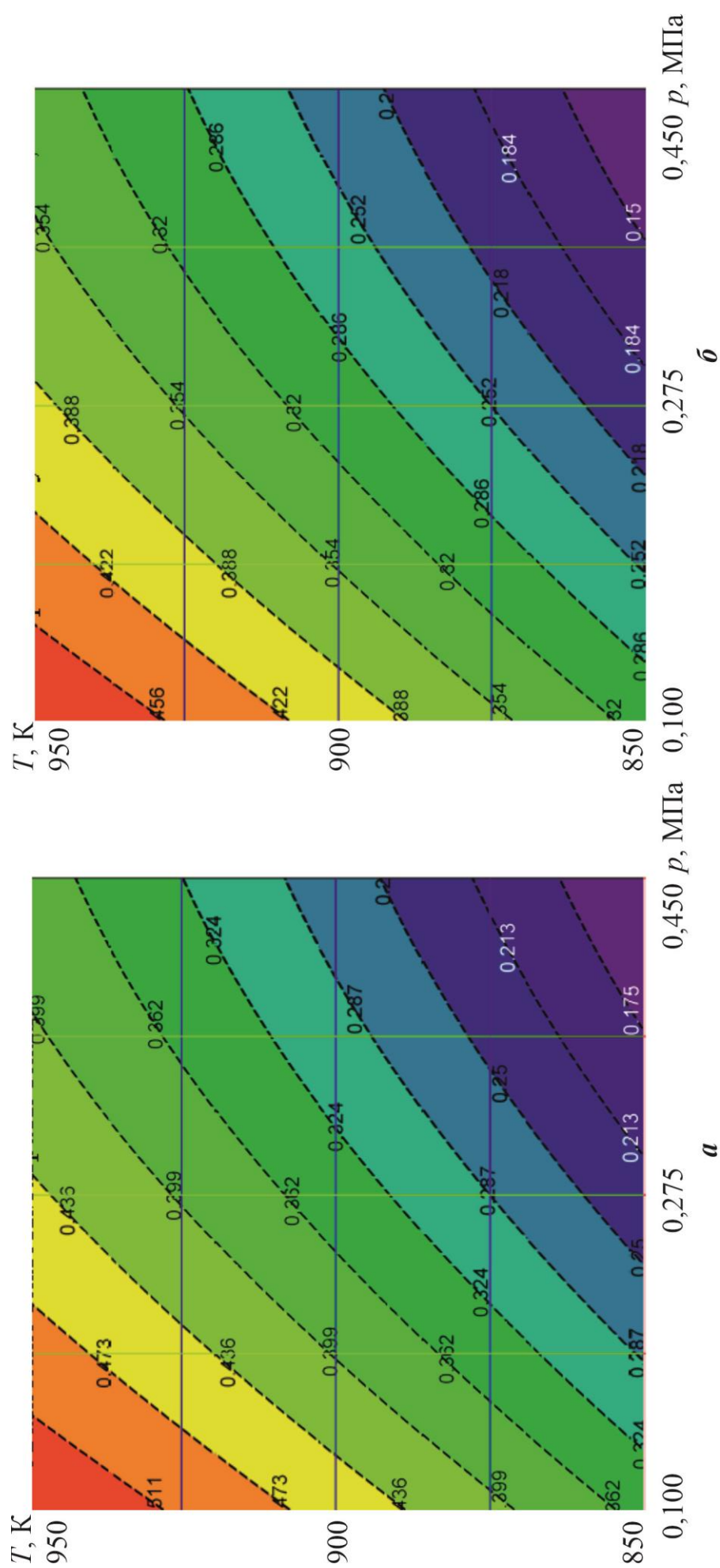


Рисунок 3.38 – Параметричні залежності $\bar{Q}' = f(T_{THR}, p_{THR})$ (a) та $\bar{Q} = f(T_{THR}, p_{THR})$ (б), які визначено при фіксованому значенні $s/bf = 0.3$

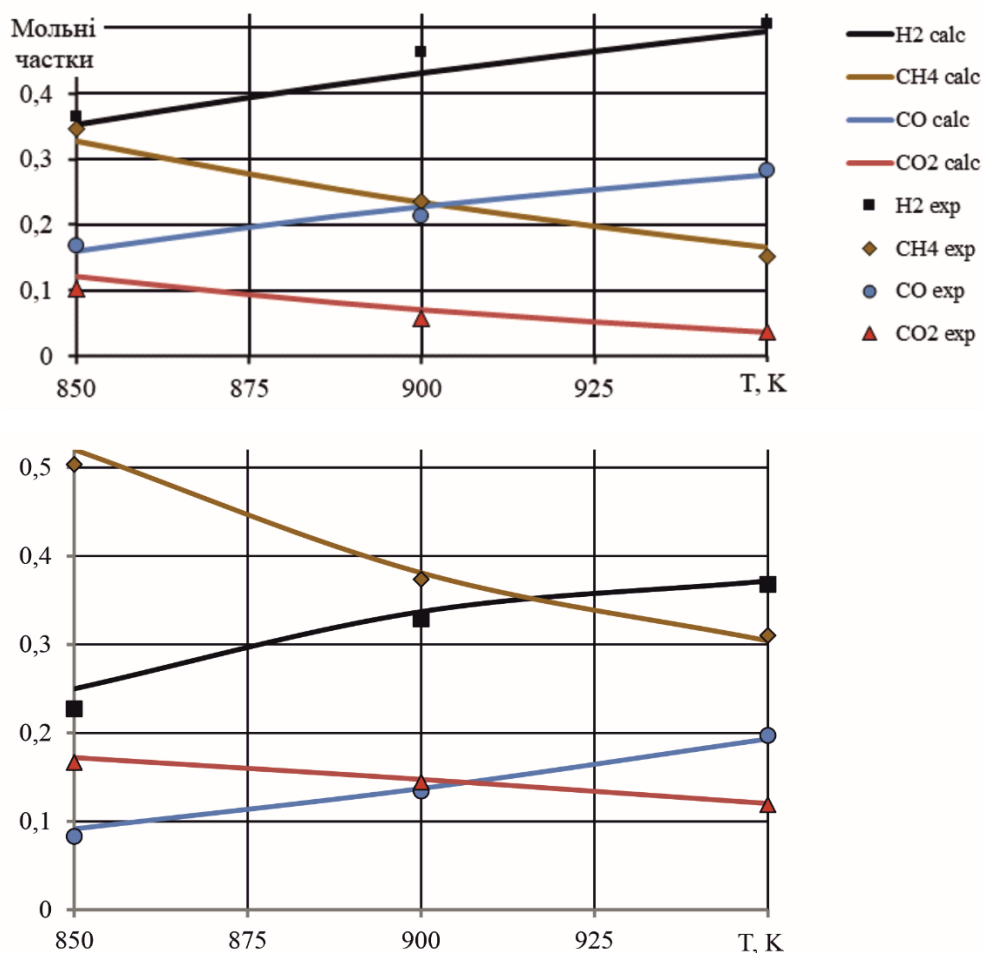


Рисунок 3.39 – Співставлення результатів експериментальних досліджень складу синтез-газу та результатів теоретичних розрахунків для $s/bf=0,3$: **a** – $p_{THR} = 0,1$ МПа; **б** – $p_{THR} = 0,45$ МПа
H2 calc, CH4 calc, CO calc, CO2 calc – розрахунок;
H2 exp, CH4 exp, CO exp, CO2 exp – експериментальні дані

Висновки за третім розділом

1. Запропонована багаторівнева класифікація структурних схем енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування дозволила провести системний аналіз ефективності схемних рішень суднових енергетичних установок, а також надати порівняльну оцінку традиційним та інноваційним технологіям.

2. Доведено, що регресійні залежності приросту теплотворної здатності від температури реакції парової конверсії $\Delta H_U = f(T_{THR})$ можуть використовуватися для оцінки ефективності термохімічної утилізації, але не дозволяють в повній мірі враховувати вплив параметрів вторинних енергоресурсів та обмежень, що

накладаються параметрами системи подачі газоподібного палива в двигун на ефективність термохімічної обробки палива.

3. Запропоновано використовувати коефіцієнт збільшення теплоти згоряння базового палива $\overline{H}_u = f(T_{THR}, p_{THR}, s/bf)$ в якості основного критерію оцінки енергоефективності процесів термохімічної обробки палив, а ступінь конверсії ζ та вміст вуглецю в синтез газі CC_{Syngas} - в якості критеріїв оцінки ефективності конверсії вуглеводнів та зниження викидів CO_2 .

4. Виявлено обмеження, які пов'язані з впливом основних параметрів процесу конверсії на діапазон застосування термохімічної обробки палива в залежності від властивостей палив:

- ефективна конверсія спиртів, а також помірна конверсія природного газу та його основних складових забезпечується термохімічною утилізацією теплоти відпрацьованих газів енергомодулів DF/GTE/EI;

- ефективна конверсія метанолу та помірна конверсія етанолу забезпечується термохімічною утилізацією теплоти відпрацьованих газів енергомодулів DF/D4S/EI;

- температурний потенціал скидної теплоти енергомодулів DF/D2S/Dr достатній для ефективних перетворень енергії в металогідридних утилізаційних установках.

5. Для розрахунку коефіцієнта збільшення теплоти згоряння в межах заданих діапазонів температур та тисків запропоновано регресійні залежності, які враховують комплексний вплив температури, тиску та відношення водяна пара/базове паливо. Встановлено, що раціональне масове відношення водяна пара/базове паливо складає для газоподібних вуглеводневих палив 6–7, для рідинних спиртових палив 0,6–0,9.

6. Проведено експериментальні дослідження комплексного впливу температури, тиску та складу суміші на ефективність термохімічної обробки палива на базі етанолу з визначенням витрат теплової та механічної потужності при обробці палива. Фізичним моделюванням процесів термохімічної обробки

палива підтверджена адекватність отриманих регресійних залежностей

$$\bar{H}_U = f(T_{THR}, p_{THR}, s / bf).$$

7. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що витрати механічної енергії при організації процесів термохімічної обробки палива та підведення отриманих модифікованих продуктів до двигуна зменшують ефективність термохімічної утилізації на 6-12 %, що вимагає їх мінімізації за рахунок раціонального вибору схемних рішень суднової енергетичної установки.

Основні наукові результати розділу опубліковано в [57–63, 76, 82, 83, 113, 114, 120, 122, 127, 128, 131, 145, 146].

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МОДУЛЯХ З ТЕРМОХІМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

4.1 Розробка моделі енергетичного модуля з термохімічною утилізацією вторинних енергоресурсів теплових двигунів

Застосування сучасних об'єктно-орієнтованих підходів до дослідження складних технічних систем (детальніше розглянуто в розділі 2) дозволяє представити енергетичний модуль з термохімічними системами утилізації (ТХСУ) вторинних енергоресурсів у вигляді сукупності підсистем:

- енергетичної підсистеми, в якій хімічна енергія палива перетворюється в механічну, електричну та теплову енергію;
- підсистеми термохімічної утилізації та перетворення енергії.

Підсистема термохімічної утилізації та перетворення енергії складається з двох частин:

- контуру утилізації теплоти, що призначений для підводу теплоти вторинних енергоресурсів двигуна до споживачів контуру термохімічного перетворення енергії;
- контур термохімічного перетворення енергії, який може бути виконано в формі блоку термохімічної обробки палива або групи блоків металогідридної утилізаційної установки.

Математичний опис фізико-хімічних процесів в блоках, групах блоків та в самих підсистемах спирається на рівняння матеріального та енергетичного балансу, які замикаються співвідношеннями для паро-рідинної рівноваги, кінетики хімічних перетворень та ін. (рис. 4.1).

Балансові рівняння [147] містять у собі:

- баланс енергії для кожного k -го блоку:

$$\sum_{j=1}^{J_k-N_k} (k_{OC} m H)_j + \sum_{n=1}^{N_k} (k_{OC} N)_n = 0; \quad (4.1)$$

- баланс витрат для l -го енергоносія кожного k -го блоку:

$$\sum_{j=1}^{J_{kl}} m_j = 0; \quad (4.2)$$

- балансу тиску для l -го енергоносія кожного k -го блоку:

$$(p_{in} + (-1)^{np} \Delta p - p_{ou})_{kl} = 0; \quad (4.3)$$

- співвідношення змін термодинамічних потенціалів: ΔH_{kl} , ΔS_{kl} , ΔGb_{kl} для l -го енергоносія в k -му блоці:

$$(H_{in} + (-1)^{nh} \Delta H - H_{out})_{kl} = 0, \quad (4.4)$$

$$\Delta Gb_{kl} = \Delta H_{kl} - T \Delta S_{kl}, \quad (4.5)$$

де $k = 1, 2, \dots, K$; $l = 1, 2, \dots, L_k$; $j = 1, 2, \dots, J_{kl}$; $n = 1, 2, \dots, N_k$; Δp – характеристика зміни тиску енергоносіїв в елементах; ΔH – зміна ентальпії; ΔS – зміна ентропії; ΔGb – зміна енергії Гіббсу; k_{OC} – коефіцієнт, який враховує витрати енергії відповідного енергоносія в навколишнє середовище; R – газова стала; T – температура; m – масова витрата; індекси визначають номери: k – елементу, l – енергоносію, n – зв'язку.

Кожний з блоків (груп блоків) характеризується масивами граничних параметрів та обмежень Z_k та конструктивних параметрів Z_k^k . Ці параметри визначають характер протікання процесів та одночасно віддзеркалюють зв'язки між елементами [147, 148].

Для кожного типу блоків визначається критерій ефективності.

Робота всіх роторних пристроїв зміни тиску, як для любого механічно зворотного процесу, розраховується як

$$W = \int p dV, \quad (4.6)$$

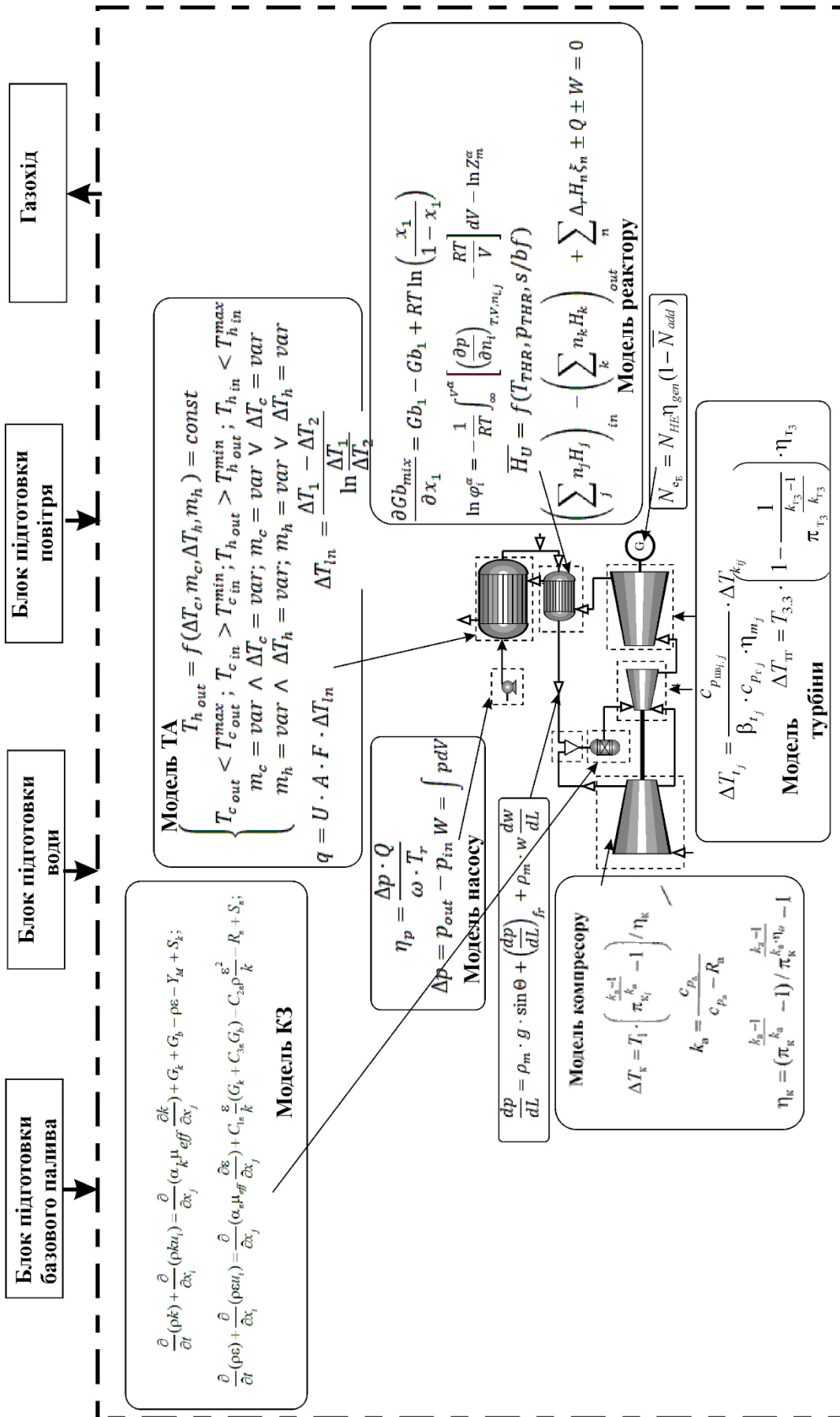
де W – робота; V – об'єм; dp – зміна тиску.

Тому для турбін, компресорів, насосів характеристика зміни тиску

$$\Delta p_{kl} = \Delta p_{kl}(Z_k, Z_k^k), \quad (4.7)$$

а ефективність визначається значенням внутрішнього ККД

$$\eta_{kl} = \eta_{kl}(Z_k, Z_k^k). \quad (4.8)$$



Допустимі діапазони зміни термодинамічних, витратних та конструктивних

Рисунок 4.1 – Розрахункові блоки енергетичного модуля на базі ГТД з ТХСУ (розрахункові залежності представлено укрупнено)

параметрів блоків Z_k и Z_k^k задано системою обмежень у вигляді нерівностей сукупностей параметрів

$$Z_k^{\min} \leq Z_k \leq Z_k^{\max} \quad \text{та} \quad Z_k^{k\min} \leq Z_k^k \leq Z_k^{k\max}. \quad (4.9)$$

Стосовно до характеристик блоків ці залежності прийнято у вигляді

$$T_{qmk}^{\min} \leq T_{qm}(Z_k, Z_k^k) \leq T_{qmk}^{\max}; \quad \beta_{qmk}^{\min} \leq \beta_{qm}(Z_k, Z_k^k) \leq \beta_{qmk}^{\max}. \quad (4.10)$$

Зв'язок між блоками підсистем здійснюється потоками енергоносіїв (теплоносіїв і робочих тіл циклів), за допомогою яких здійснюються процеси енергетичної взаємодії між підсистемами і в цілому в енергетичному модулі. Характеристики теплоносіїв визначаються основними термодинамічними параметрами (тиск та температура), витратою та фізико-хімічними властивостями (склад, густина, в'язкість, енергетичні потенціали та ін.).

Визначення термодинамічних характеристик потоків теплоносіїв та параметрів робочих середовищ робочих тіл циклів спирається на закономірності фазової рівноваги, які в загальному вигляді описано рівнянням:

$$f_i^v = f_i^l, \quad (4.11)$$

де f_i^v, f_i^l – фугітивність (летючість) компоненту i в паровій та рідкій фазі відповідно.

Прикладні рівняння фазової рівноваги базуються на коефіцієнті фугітивності:

$$\ln \varphi_i^\alpha = -\frac{1}{RT} \int_\infty^{V^\alpha} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial n_i} \right)_{T,V,n_{i,j}} - \frac{RT}{V} \right] dV - \ln Z_m^\alpha, \quad (4.12)$$

де φ_i^α – коефіцієнт фугітивності ($f_i^v = \varphi_i^\alpha y_i p, f_i^l = \varphi_i^\alpha x_i p$); $\alpha = v$ для пари, $\alpha = l$ для рідини; V – загальний об'єм; n_i – кількість молей компонента i .

В подальшому за допомогою рівнянь стану (2.27)–(2.30) визначаються термодинамічні властивості робочих середовищ при умовах протікання процесу для парової та рідкої фаз. Для металогідридних середовищ враховано тверду фазу.

Встановлення закономірностей фізико-хімічних перетворень енергії при

моделюванні процесів в елементах підсистем, групах елементів та в самих підсистемах потребує визначення енергетичних потенціалів: ентальпії, ентропії, енергії Гіббсу.

Існує декілька підходів до визначення еталонного початкового значення (або точки відліку) для ентальпії. Згідно з [71] за початкові умови прийнята стандартна температура 298,15 К та тиск 101,325 кПа (0,1 МПа). Ентальпія хімічної сполуки розраховується як тричлен, який складається з наступних складових (рис. 4.2):

- зміна ентальпії, яка пов'язана з реакцією елементів при вищевказаних початкових умовах (298,15 К та 101,325 кПа та базовому стані: пара, рідина), при утворенні сполуки в умовах ідеального газу (IG);

- зміна ентальпії, яка пов'язана з приведенням сполуки від базових умов до температури системи в умовах IG, обчислюється як:

$$\int_{298,15}^T c_p^{IG} dT; \quad (4.13)$$

- зміна ентальпії, яка пов'язана з приведенням сполуки до тиску системи та стану реального газу.



Рисунок 4.2 – Діаграма визначення ентальпії

Розрахунок енергетичних потенціалів виконується за наступними залежностями:

– для ентальпії

$$(H_m - H_m^{ig}) = -\int_{\infty}^V \left(p - \frac{RT}{V} \right) dV - RT \ln \left(\frac{V}{V^{ig}} \right) + T(S_m - S_m^{ig}) + RT(Z_m - 1); \quad (4.14)$$

– для ентропії

$$(S_m - S_m^{ig}) = -\int_{\infty}^V \left[\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right) - \frac{R}{V} \right] dV + R \ln \left(\frac{V}{V^{ig}} \right); \quad (4.15)$$

– для енергії Гіббсу

$$(Gb_m - Gb_m^{ig}) = -\int_{\infty}^V \left(p - \frac{RT}{V} \right) dV - RT \ln \left(\frac{V}{V^{ig}} \right) + RT(Z_m - 1). \quad (4.16)$$

Базова ентальпія ідеального газу визначається як

$$H_m^{ig} = \sum_i y_i \left[\Delta_f H_i^{ig} + \int_{T_0}^T c_{p,i}^{ig}(T) dT \right], \quad (4.17)$$

де $c_{p,i}^{ig}$ - теплоємність ідеального газу; $\Delta_f H_i^{ig}$ - стандартна ентальпія утворення для ідеального газу при початкових умовах (298,15 K та 101,325 кПа).

4.2 Математичні моделі підсистем енергетичного модулю

4.2.1 Математичні моделі основних елементів підсистеми термохімічної утилізації та перетворення енергії

4.2.1.1 Моделювання процесів в обладнанні блоків термохімічної обробки палива

В першу чергу термохімічна обробка палива потребує моделювання фізико-хімічних процесів в реакторах, як головних блоках підсистеми.

Матеріальний баланс для i -го компонента n -ої реакції в реакторі з j -вхідними матеріальними потоками та k -вихідними потоками в стаціонарному режимі виглядає як

$$\left(\sum_j n_{ij} \right)_{\text{in}} - \left(\sum_k n_{ik} \right)_{\text{out}} + \left(\sum_n \xi_n \right)_{\text{in}} = 0, \quad (4.18)$$

де n_{ij} – молярна витрата компоненту i в j -му вхідному потоці; n_{ik} – молярна

витрата компонента i в k -му вихідному потоці; v_{in} – стехіометричний коефіцієнт компонента i в реакції n ; ξ_n – ступінь повноти реакції n .

Останній член лівої частини рівняння являє собою загальну кількість компонента i , який отримується або споживається у всіх хімічних реакціях та може бути обчислений як

$$\left(\sum_n \xi_n \right)_{in} = n_{i,in} - n_{i,out} . \quad (4.19)$$

Баланс енергії для реактора

$$\left(\sum_j n_j H_j \right)_{in} - \left(\sum_k n_k H_k \right)_{out} + \sum_n \Delta_r H_n \xi_n \pm Q \pm W = 0, \quad (4.20)$$

де n_j – молярна витрата в j -му вхідному потоці; n_k – молярна витрата в k -му вихідному потоці; H_j – ентальпія j -го вхідного потоку; H_k – ентальпія k -го вихідного потоку; $\Delta_r H_n$ – ентальпія реакції n ; Q – потік теплоти, яка отримується або споживається в термохімічній системі; W – потужність, яка додається або відбирається від термохімічної системи.

Обрана в результаті аналізу початкових параметрів та процесів в термохімічній системі модель реактора передбачає розрахунок складу потоку за умов припущення фазової (4.11) та хімічної (4.19) рівноваги у вихідному потоці.

Умови хімічної рівноваги формуються як рівність нулю ізобарно-ізотермічного потенціалу (вільної енергії Гіббса):

$$\Delta_r Gb = 0; \quad (4.21)$$

$$\Delta_r Gb = \Delta_r Gb^o + RT \ln \prod_i a_i^{v_i}, \quad (4.22)$$

де $\Delta_r Gb^o$ – стандартна вільна енергія Гіббса; a_i – активність компоненту i ; v_i – стехіометричний коефіцієнт компонента i ; R – газова стала; T – температура.

Стандартна вільна енергія Гіббса хімічної реакції може бути розрахована для рівноважного стану як

$$\Delta_r Gb^o = -RT \ln K_e, \quad (4.23)$$

де $K_e = \prod_i a_i^{v_i}$ – константа рівноваги хімічної реакції.

Склад продукту розраховується за умов мінімізації вільної енергії Гіббса всієї суміші. Так, якщо енергія Гіббса для ідеальної суміші визначається як

$$Gb_{mix} = \sum_i x_i Gb_i + RT \sum_i x_i \ln x_i, \quad (4.24)$$

то умова мінімізації загальної енергії Гіббса для двокомпонентної суміші формулюється як умова рівності нулю похідної

$$\frac{\partial Gb_{mix}}{\partial x_1} = Gb_1 - Gb_1 + RT \ln \left(\frac{x_1}{1 - x_1} \right). \quad (4.25)$$

Аналогічний підхід застосовується в випадках більш складних систем з декількома фазами та більшою кількістю компонентів.

Через складність фізико-хімічних процесів при побудові математичної моделі процесів в реакторі були зроблені певні допущення, які спрощують процедуру числового розв'язання:

- робоча зона всередині реактору є ізотермічною;
- час перебування реагентів достатній, щоб досягти рівноваги вільної енергії Гіббса під час реакції;
- розрахунки виконуються для усталеного режиму.

Другими за значимістю блоками підсистеми термохімічної обробки палива є теплообмінні апарати (ТА) та пристрої, які призначені для зміни тиску робочих середовищ. Розгляд математичних моделей ТА та пристроїв зміни тиску надано в пункті 4.2.1.3.

4.2.1.2 Моделювання процесів в обладнанні групи блоків металогідридної утилізаційної установки

Корисна механічна потужність W_e визначається механічною потужністю водневої розширювальної машини W_{HE} за вирахуванням потужності, яка витрачена на перекачку суспензії W_{ESP} і потужності на перекачування теплоносіїв гарячого W_{TLP} та холодного W_{WP3} контурів:

$$W_e = W_{HE} - W_{ESP} - W_{TLP} - W_{WP3}. \quad (4.26)$$

Потужність водневої розширювальної машини W_{HE} :

$$W_{HE} = \dot{m}_{H_2} [h_9(P_9, T_9) - h_{10}(P_{10}, s_9(P_9, T_9))] \eta_o, \quad (4.27)$$

де \dot{m}_{H_2} – масова витрата водню; $h_9(P_9, T_9)$ – питома ентальпія водню на вході в розширювальну машину; $s_9(P_9, T_9)$ – питома ентропія водню на вході в розширювальну машину; $h_{10}(P_{10}, s_9(P_9, T_9))$ – питома ентальпія водню на виході з розширювальної машини при значенні питомої ентропії на вході; η_o – ефективний ККД водневої розширювальної машини.

Тиски процесів десорбції і сорбції P_d і P_s визначаються температурами та властивостями обраного металогідриду. Взаємозв'язок рівноважного тиску і температури металогідриди визначається рівнянням Вант-Гоффа

$$\ln P_d = \frac{\Delta h_d}{T_d R} + \frac{\Delta s_d}{R}, \quad \ln P_s = \frac{\Delta h_s}{T_s R} + \frac{\Delta s_s}{R}, \quad (4.28)$$

Потужність, що витрачається на перекачування суспензії:

$$W_{ESP} = \frac{\dot{m}_{SE}}{\rho_{SE}} (P_d - P_a) \eta_{ESP}, \quad (4.29)$$

де $\frac{\dot{m}_{SE}}{\rho_{SE}}$ – об'ємна витрата суспензії.

Витрата суспензії визначається сорбційною ємністю металогідриду c_{H_2} та концентрацією металогідриду в суспензії c_{MG} :

$$\dot{m}_{MG} = \frac{\dot{m}_{H_2}}{c_{H_2}}; \quad \dot{m}_{SE} = \frac{\dot{m}_{MG}}{c_{MG}}. \quad (4.30)$$

У контурах нагріву і охолодження масова витрата теплоносія визначається виходячи з теплового балансу теплообмінників HD и HA:

$$\dot{m}_{TL} = \frac{Q_{5-d} + Q_d}{c_{TL}(T_{21} - T_{16})} \quad \dot{m}_v = \frac{Q_{1-s} + Q_s}{c_w(T_{13} - T_{12})}. \quad (4.31)$$

Теплота нагріву суспензії від температури сорбції до температури десорбції і теплота реакції визначаються рівняннями

$$Q_{5-d} = \dot{m}_{SE} c_{SE} (T_d - T_s); \quad Q_{1-s} = \dot{m}_{SE} c_{SE} (T_1 - T_s); \quad (4.32)$$

$$Q_d = \Delta h_d \dot{m}_{H_2}; \quad Q_s = \Delta h_s \dot{m}_{H_2}. \quad (4.33).$$

Розгляд математичних моделей ТА та пристроїв зміни тиску надано в

наступному підрозділі.

4.2.1.3 Моделювання процесів в обладнанні блоку утилізації теплоти

Блок утилізації теплоти призначено для підводу теплоти вторинних енергоресурсів двигуна до споживачів підсистеми термохімічної обробки палива або металогідридної утилізаційної установки.

Основними структурно-функціональними блоками є теплообмінні апарати. Зв'язок між блоками здійснюється матеріальними потоками робочих середовищ за допомогою трубопроводів та пристроїв підвищення тиску – насосів та компресорів.

Математична модель ТА (рис. 4.3) заснована на рівняннях матеріального балансу (4.34), енергетичного балансу (4.35)-(4.37) та фазових термодинамічних співвідношеннях (2.27)-(2.30).

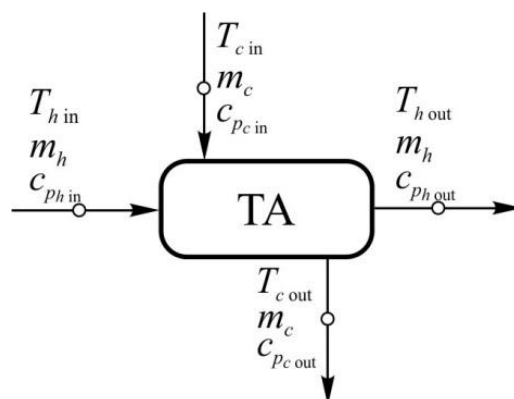


Рисунок 4.3 – Схема потоків робочих середовищ в ТА

Рівняння матеріального балансу ТА має вигляд

$$\sum_{i,j} m_{i,\text{in}}^j = \sum_{i,j} m_{i,\text{out}}^j = m_{\text{in}} = m_{\text{out}} = m, \quad (4.34)$$

де i – означає потоки; j – компоненти; in, out – відносяться до параметрів вхідних та вихідних потоків відповідно.

Енергетичний баланс ТА може бути записано в загальному вигляді

$$q = m(H_{\text{out}} - H_{\text{in}}) + q_l, \quad (4.35)$$

$$H_{\text{in}} = \int_{298,15}^{T_{\text{in}}} c_{p_{\text{in}}} dT + \Delta v H_{\text{in}}, \quad (4.36)$$

$$H_{\text{out}} = \int_{298,15}^{T_{\text{out}}} c_{p_{\text{out}}} dT + \Delta v H_{\text{out}}, \quad (4.37)$$

де m – загальний масовий потік; q – тепловий потік; q_l – витрати теплоти; $c_{p_{in}}$ та $c_{p_{out}}$ – теплоємності вхідного та вихідного потоку відповідно; ΔvH_{in} та ΔvH_{out} – зміна ентальпій за рахунок переходу фаз для вхідного та вихідного потоку відповідно.

Для сталого режиму в кожухотрубному теплообміннику (наприклад, стандарту ТЕМА) теплове навантаження визначається як:

$$q = UAF \Delta T_{ln}, \quad (4.38)$$

де U – коефіцієнт тепловіддачі; A – площа поверхні теплообміну; ΔT_{ln} – середній логарифмічний температурний напір; F – кореляційний коефіцієнт.

Середній температурний напір визначається наступним чином

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}, \quad (4.39)$$

де $\Delta T_1 = \Delta T_{h_{in}} - \Delta T_{c_{in}}$ та $\Delta T_2 = \Delta T_{h_{out}} - \Delta T_{c_{out}}$ – якщо ТА виконано за прямотоковою схемою; $\Delta T_1 = \Delta T_{h_{in}} - \Delta T_{c_{out}}$ та $\Delta T_2 = \Delta T_{h_{out}} - \Delta T_{c_{in}}$ – якщо ТА виконано за протитоковою схемою.

Кореляційний коефіцієнт

$$F = \frac{\sqrt{R^2 + 1} \ln \frac{(1-S)}{(1-RS)}}{(R-1) \ln \frac{2-S(R+1-\sqrt{R^2+1})}{2-S(R+1+\sqrt{R^2+1})}}, \quad (4.40)$$

$$\text{де } R = \frac{T_{h_{in}} - T_{h_{out}}}{T_{c_{out}} - T_{c_{in}}}; \quad S = \frac{T_{c_{out}} - T_{c_{in}}}{T_{h_{in}} - T_{c_{in}}}.$$

Процедура оптимізації процесів термохімічних перетворень потребує налаштування моделі теплообмінного апарату з урахуванням існуючих обмежень та вимог. Розглянемо деякі з варіантів налаштування моделі ТА.

1. Забезпечення заданого значення температури гарячого потоку на виході

$T_{h_{out}}$ при наступних обмеженнях:

- мінімальної температури холодного потоку на вході (наприклад, $T_{c_{in}}^{\min} = T^A$, де T^A – температура навколишнього середовища);
- максимальної температури холодного потоку на виході (наприклад, $T_{c_{out}}^{\max} = T_{c_{out}}^D$, де $T_{c_{out}}^D$ – температура кипіння в умовах холодного потоку на виході);
- мінімальної температури гарячого потоку на виході (наприклад, температура $T_{h_{out}}^{\min} = T_{h_{out}}^D$, де $T_{h_{out}}^D$ - температура точки роси в умовах на виході гарячого потоку);
- максимальної температури гарячого потоку на вході (наприклад, температура $T_{h_{in}}^{\max} = T_{h_{in}}^{SW}$, де $T_{h_{in}}^{SW}$ - температура насиченої пари в умовах на вході гарячого потоку).

Забезпечення заданого фіксованого значення $T_{h_{out}}$ потребує варіювання наступних параметрів: витрат холодного та/або гарячого середовищ; різниці температур $\Delta T_c = T_{c_{out}} - T_{c_{in}}$ та $\Delta T_h = T_{h_{out}} - T_{h_{in}}$ по холодній та/або гарячій сторонах. Математичний опис вказаного налаштування ТА надано у вигляді системи:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{h_{out}} = f(\Delta T_c, m_c, \Delta T_h, m_h) = \text{const}; \\ T_{c_{out}} < T_{c_{out}}^{\max}; T_{c_{in}} > T_{c_{in}}^{\min}; T_{h_{out}} > T_{h_{out}}^{\min}; T_{h_{in}} < T_{h_{in}}^{\max}; \\ m_c = \text{var} \wedge \Delta T_c = \text{var}; m_c = \text{var} \vee \Delta T_c = \text{var}; \\ m_h = \text{var} \wedge \Delta T_h = \text{var}; m_h = \text{var} \vee \Delta T_h = \text{var}. \end{array} \right. \quad (4.41)$$

2. Забезпечення фіксованого значення зниження температури гарячого потоку $\Delta T_h = T_{h_{in}} - T_{h_{out}}$ при тих же самих обмеженнях

$$\left\{ \begin{array}{l} T_h = f(\Delta T_c, m_c, \Delta T_h, m_h) = \text{const}; \\ T_{c_{out}} < T_{c_{out}}^{\max}; T_{c_{in}} > T_{c_{in}}^{\min}; T_{h_{out}} > T_{h_{out}}^{\min}; T_{h_{in}} < T_{h_{in}}^{\max}; \\ m_c = \text{var} \wedge \Delta T_c = \text{var}; m_c = \text{var} \vee \Delta T_c = \text{var}; \\ m_h = \text{var} \wedge \Delta T_h = \text{var}; m_h = \text{var} \vee \Delta T_h = \text{var}. \end{array} \right. \quad (4.42)$$

3. Забезпечення фіксованого значення різниці температур гарячого потоку на виході $T_{h_{out}}$ та холодного потоку на вході $T_{c_{in}}$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{h_{out}} - T_{c_{in}} = f(\Delta T_c, m_c, \Delta T_h, m_h) = \text{const}; \\ T_{c_{out}} < T_{c_{out}}^{\max}; T_{c_{in}} > T_{c_{in}}^{\min}; T_{h_{out}} > T_{h_{out}}^{\min}; T_{h_{in}} < T_{h_{in}}^{\max}; \\ m_c = \text{var} \wedge \Delta T_c = \text{var}; m_c = \text{var} \vee \Delta T_c = \text{var}; \\ m_h = \text{var} \wedge \Delta T_h = \text{var}; m_h = \text{var} \vee \Delta T_h = \text{var}. \end{array} \right. \quad (4.43)$$

4. Забезпечення фіксованого ступеню переохолодження гарячого потоку на виході $T_{h_{out}}^D - T_{h_{out}}$, де $T_{h_{out}}^D$ - температура точки роси в умовах гарячого потоку на виході

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{h_{out}}^D - T_{h_{out}} = f(\Delta T_c, m_c, \Delta T_h, m_h) = \text{const}; \\ T_{c_{out}} < T_{c_{out}}^{\max}; T_{c_{in}} > T_{c_{in}}^{\min}; T_{h_{out}} > T_{h_{out}}^{\min}; T_{h_{in}} < T_{h_{in}}^{\max}; \\ m_c = \text{var} \wedge \Delta T_c = \text{var}; m_c = \text{var} \vee \Delta T_c = \text{var}; \\ m_h = \text{var} \wedge \Delta T_h = \text{var}; m_h = \text{var} \vee \Delta T_h = \text{var}. \end{array} \right. \quad (4.44)$$

5. Забезпечення фіксованого ступеня перегріву холодного потоку на виході $T_{c_{out}} - T_{c_{out}}^S$, де $T_{c_{out}}^S$ - температура кипіння в умовах холодного потоку на виході

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{h_{out}} - T_{c_{out}}^S = f(\Delta T_c, m_c, \Delta T_h, m_h) = \text{const}; \\ T_{c_{out}} < T_{c_{out}}^{\max}; T_{c_{in}} > T_{c_{in}}^{\min}; T_{h_{out}} > T_{h_{out}}^{\min}; T_{h_{in}} < T_{h_{in}}^{\max}; \\ m_c = \text{var} \wedge \Delta T_c = \text{var}; m_c = \text{var} \vee \Delta T_c = \text{var}; \\ m_h = \text{var} \wedge \Delta T_h = \text{var}; m_h = \text{var} \vee \Delta T_h = \text{var}. \end{array} \right. \quad (4.45)$$

Аналогічно можуть бути розглянуті й інші варіанти налаштування моделі.

Гідравлічний опір теплообмінного апарату¹ в залежності від рівня деталізації визначається або за результатами гідравлічного розрахунку з урахуванням конфігурації та геометрії апарату [149], або за допомогою співвідношення

$$Q = k \sqrt{\rho} \sqrt{p_{in} - p_{out}}, \quad (4.46)$$

де Q – об’ємна витрата; ρ – густина; p_{in} , p_{out} – тиск на вході та виході ТА, відповідно.

Моделювання процесів в блоці термохімічної обробки палива не можливо без математичного опису роботи пристроїв, які призначені для зміни тиску

¹ Гідравлічний опір термохімічного реактору визначається аналогічно.

робочих середовищ – насосів та компресорів. Найбільший інтерес представляють енергетичні характеристики, в першу чергу витрати енергії на підвищення тиску потоку рідини (для насосів) або газу (для компресорів). Енергетична ефективність процесу підвищення тиску Δp за умов забезпечення заданої витрати робочого середовища Q оцінюється для роторних насосів як

$$\eta_p = \frac{\Delta p Q}{\omega T_r}, \quad (4.47)$$

де $\Delta p = p_{\text{out}} - p_{\text{in}}$; p_{in} – тиск на вході до насосу; p_{out} – тиск на виході з насосу; ω – кутова швидкість; T_r – крутний момент.

Питання моделювання процесів в системі термохімічної обробки палива потребує використання коректного математичного опису гідравлічних особливостей при протіканні рідини в трубопроводах.

Втрата тиску в трубі розраховується за наступною залежністю

$$\frac{dp}{dL} = \rho_m g \sin \Theta + \left(\frac{dp}{dL} \right)_{f_r} + \rho_m w \frac{dw}{dL}, \quad (4.48)$$

де p – тиск; L – довжина труби; ρ_m – густина робочого середовища; Θ – кут нахилу труби; f_r – коефіцієнт тертя, w – швидкість руху.

Для двофазних робочих середовищ розрахунок втрат тиску в трубопроводах та локальних гідравлічних опорів суттєво ускладнюється.

В такому випадку можливо використання так званого методу HTFS [150], згідно з яким втрати тиску для двофазної течії розраховуються як

$$\Delta p = \Delta p_l + C_c \sqrt{(\Delta p_l + \Delta p_g)} + \Delta p_g, \quad (4.49)$$

де Δp_l – втрати тиску для розрахунку рідкої фази; Δp_g – втрати тиску для розрахунку газової фази; C_c – кореляційний коефіцієнт.

4.2.2 Математична модель енергетичної підсистеми та її основних елементів

Продукти конверсії базової вуглеводневої сировини, що отримані із підсистеми термохімічної обробки палива, використовуються в якості палива

теплового двигуна (або групи двигунів), який забезпечує вироблення механічної енергії на вихідному валу.

Ефективна потужність енергетичної підсистеми визначається як:

$$N_e = N_{HE} \eta_{gen} \left(1 - \bar{N}_{add} \right), \quad (4.50)$$

де N_{HE} – ефективна потужність теплового двигуна; \bar{N}_{add} – величина, яка враховує витрати потужності на привід насосів і компресорів контурів підведення базового палива, системи термохімічної утилізації та іншого необхідного допоміжного обладнання, у тому числі на опріснювальну установку (ОУ).

В залежності від схеми енергетичної установки можливо подальше перетворення отриманої механічної енергії в електричну.

Ефективна потужність енергетичної підсистеми з електричною передачею

$$N_{eE} = N_e \eta_{gen}, \quad (4.51)$$

де η_{gen} – ККД електричного генератора.

Головними структурними складовими енергетичної підсистеми є теплові двигуни. Згідно з проведеним раніше аналізом складу енергетичних комплексів існуючих та перспективних високотехнологічних суден інтерес становлять газотурбінні двигуни простого та регенеративного циклів та двопаливні 4-х тактні середньобертові дизельні двигуни.

Модель газотурбінного двигуна є складовою частиною енергетичної підсистеми та енергетичного модуля (рис. 4.4).

Вона призначена для забезпечення взаємозв'язку комплексу граничних параметрів ГТД як елемента енергетичного модуля $Z_{GT} = Z_{GT}(G_i, P_i, \Delta H_i, N_{GT})$ та сукупності конструктивних параметрів двигуна $Z_{ГТД}^K = Z_{GT}^C(ГХ, ХП)$, де N_{GT} – механічна потужність ГТД; ГХ – комплекс геометричних характеристик ГТД; ХП – комплекс характеристик палива.

В основу моделі ГТД покладено співвідношення укрупненого розрахунку двигуна простого циклу [151, 152] з урахуванням втрат повного тиску в усіх елементах газоповітряного тракту і відборів повітря на охолодження лопаток

турбін (див. рис. 4.4).

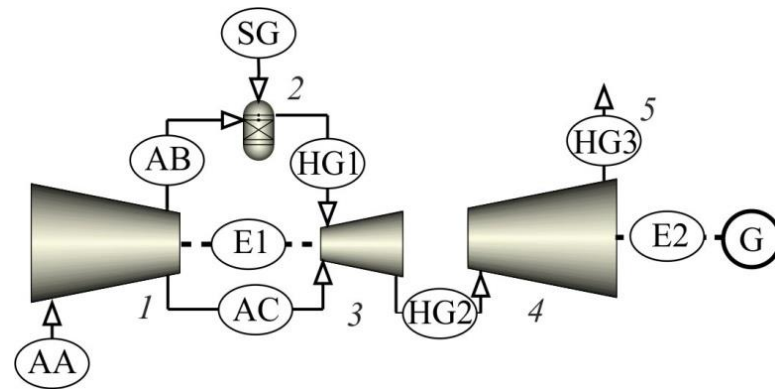


Рисунок 4.4 – Складові математичної моделі ГТД простого циклу:

блоки: 1 – компресор; 2 – камера згоряння (КЗ); 3 – турбіна газогенератора; 4 – вільна силова турбіна; 5 – газовідвідний тракт;

потоки: *матеріальні:* AA – потік повітря на вході в компресор; AB – потік повітря до КЗ; AC – потік повітря на охолодження; SG – потік синтез-газу до КЗ; HG1, HG2, HG3 – потоки газоповітряної суміші; *енергетичні:* E1 – механічний зв'язок в газогенераторі (потужність, яка підводиться від турбіни 3 до компресора 1); E2 – потужність, яка підводиться до споживача

В математичній моделі процесів підвищення тиску величина адіабатичного ККД кожного компресору визначена в залежності від міри підвищення тиску π_k та адіабатичного ККД елементарного ступеню компресору η_{ak} :

$$\eta_k = (\pi_k^{\frac{k_a-1}{k_a}} - 1) / \pi_k^{\frac{k_a-1}{k_a} \cdot \eta_a} - 1, \quad (4.52)$$

де $k_a = \frac{c_{p_a}}{c_{p_a} - R_a}$ – показник адіабати, визначений у відповідному температурному інтервалі; c_p – середня масова ізобарна теплоємність повітря; R – газова стала для процесу стискання.

Дійсна величина підвищення температури повітря при стисканні в компресорі та температура за компресором визначається як

$$\Delta T_k = T_1 \cdot \left(\pi_{k_i}^{\frac{k_a-1}{k_a}} - 1 \right) / \eta_k; \quad T_2 = T_1 + \Delta T_k, \quad (4.53)$$

де T_1 та T_2 – температура повітря на вході та за компресором відповідно.

Попередня оцінка витрати повітря на охолодження лопаткового апарату

високотемпературних частин ГТД проводиться за параметрами базових ГТД. За відсутністю таких даних виконується розрахунок за методикою [153].

Дійсний температурний перепад на турбіну приводу компресору та відповідна ступінь зниження тиску:

$$\Delta T_t = \frac{c_{p_{пв}}}{\beta_t c_{p_{\Gamma}} \eta_m} \cdot \Delta T_{k_i}; \quad \pi_{\Gamma} = \left(\frac{T_3 \eta_{\Gamma}}{T_3 \eta_{\Gamma} - \Delta T_{\Gamma}} \right)^{\frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma} - 1}}, \quad (4.54)$$

де η_{Γ} – внутрішній адіабатичний ККД турбіни компресора.

Температурний перепад в вільній силовій турбіні

$$\Delta T_{ст} = T_3 \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_{\Gamma}^{\frac{k_{\Gamma} - 1}{k_{\Gamma}}}} \right) \cdot \eta_{\Gamma}, \quad (4.55)$$

де η_{Γ} – адіабатичний ККД вільної силової турбіни.

Ефективний ККД ГТД

$$\eta_{e_{GT}} = \frac{N_{GT}}{G_{fuel} \cdot H_U}. \quad (4.56)$$

Математичну модель процесів в камері згоряння детально розглянуто в розділі 6.

Процедури верифікації та оптимізації процесів в обладнанні енергетичного модулю з термохімічним перетворенням енергії потребують налаштування моделі теплового двигуна з урахуванням існуючих обмежень та вимог. Так, при дослідженні ефективності використання термохімічної обробки палива шляхом регенерації скидної теплоти найчастіше розглядаються характеристики вже існуючих або перспективних ГТД. Ключові характеристики, такі як потужність двигуна, температура за камерою згоряння, температура газів на виході з двигуна, ступінь регенерації (для ГТД регенеративного циклу) та багато інших приймаються за базові. Модель ГТД, який працює в складі енергомодуля з термохімічною обробкою палива, необхідно налаштувати на ці базові характеристики. Тому математичні моделі структурно-функціональних блоків і груп блоків (таких як, наприклад, газотурбінний двигун) містять алгоритми

розрахунку, в тому числі налаштування на задані характеристики.

Розглянемо випадок верифікації серійного газотурбінного двигуна за наступними головними характеристиками:

- потужність двигуна N_{GT} є фіксованим значенням N_{GT}^{fix} ;
- максимальна температура за камерою згоряння T_3 не повинна перевищувати значення T_3^{fix} .

При моделюванні процесів в енергетичному модулі розрахункові значення цільової функції $Y = f(x)$ повинні відповідати умовам заданого допуску на збіжність ΔY^{tol} . В нашому випадку:

$$\Delta N_{GT} \leq \Delta N_{GT}^{tol}; \quad \Delta T_3 \leq \Delta T_3^{tol}, \quad (4.56)$$

де $\Delta N_{GT} = |N_{GT} - N_{GT}^{fix}|$ та $\Delta T_3 = |T_3 - T_3^{fix}|$ – абсолютні похибки.

Аналіз цих процесів виявив, що за інших рівних умов для цільової функції N_{GT} головною входною змінною є масова витрата палива, тобто $N_{GT} = f(G_{fuel})$. Аналогічно, для цільової функції T_3 головна входна змінна – масова витрата повітря, тобто $T_3 = f(G_{air})$. Коректне завдання початкових параметрів входних змінних значно скорочує час розрахунку та забезпечує потрібну збіжність за меншу кількість ітерацій.

В якості методу збіжності можливо використання методу Вегстайна [154], згідно якого для обчислювання змінної використовуються результати двох останніх ітерацій

$$G_{fuelk} = G_{fuelk-1} - \frac{f(G_{fuelk-1})(G_{fuelk-1} - G_{fuelk-2})}{f(G_{fuelk-1}) - f(G_{fuelk-2})}; \quad (4.57)$$

$$G_{airk} = G_{airk-1} - \frac{f(G_{airk-1})(G_{airk-1} - G_{airk-2})}{f(G_{airk-1}) - f(G_{airk-2})}. \quad (4.58)$$

На рис. 4.5 наданий алгоритм налаштування моделі ГТД на фіксовані значення цільових функцій $N_{GT} = f(G_{fuel})$ та $T_3 = f(G_{air})$.

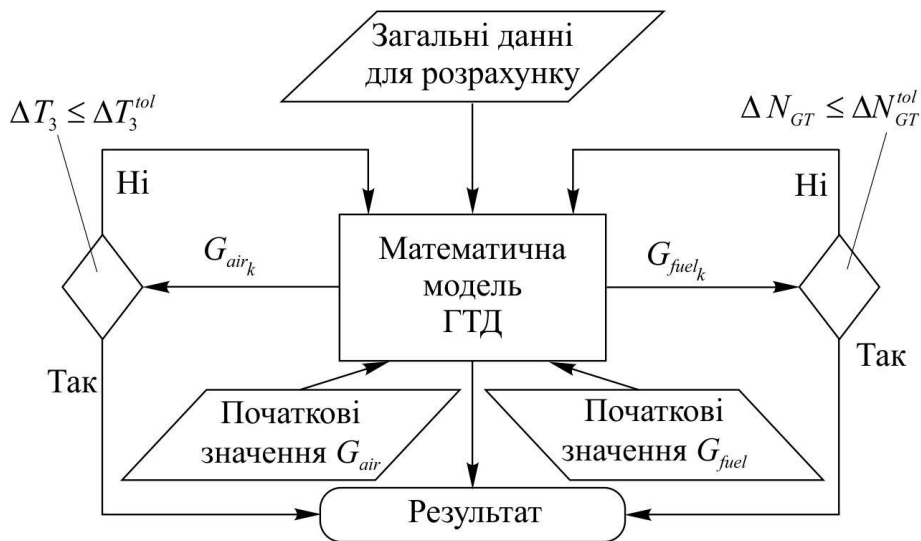


Рисунок 4.5 – Алгоритм налаштування моделі ГТД при її верифікації за цільовими функціями $N_{GT} = f(G_{fuel})$ та $T_3 = f(G_{air})$

Для визначення параметрів ДВЗ при математичному моделюванні використовувалися спеціальні програмні продукти, які розміщені виробниками двигунів на офіційних сайтах. При дослідженні для двигунів MAN Energy Solutions використовувалася on-line програма CEAS Engine Calculations, розміщена на офіційному сайті <https://marine.man-es.com>. Для двигунів концерну Wartsila використовувалася програма GTD 2, яка розміщена на офіційному сайті [https://www.wingd.com/en/engines/general-technical-data-\(gtd\)/](https://www.wingd.com/en/engines/general-technical-data-(gtd)/).

4.2.3 Алгоритм моделювання процесів в енергетичному модулі з термохімічною системою утилізації

Алгоритм розрахунку параметрів та характеристик енергетичного модуля на базі газотурбінного двигуна містить 3 основні етапи (рис. 4.6).

Перший етап передбачає налаштування моделі ГТД на ключові параметри серійного двигуна на номінальному режимі. За такі параметри обрано: потужність двигуна; температура газу за камерою згоряння, ступінь зниження тиску в турбіні або турбінах, ступінь підвищення тиску в компресорі (компресорах), масова витрата повітря, масова витрата еталонного палива (метану). Після верифікації моделі за параметрами базового двигуна проводиться налаштування моделі на роботу ГТД на альтернативному паливі.

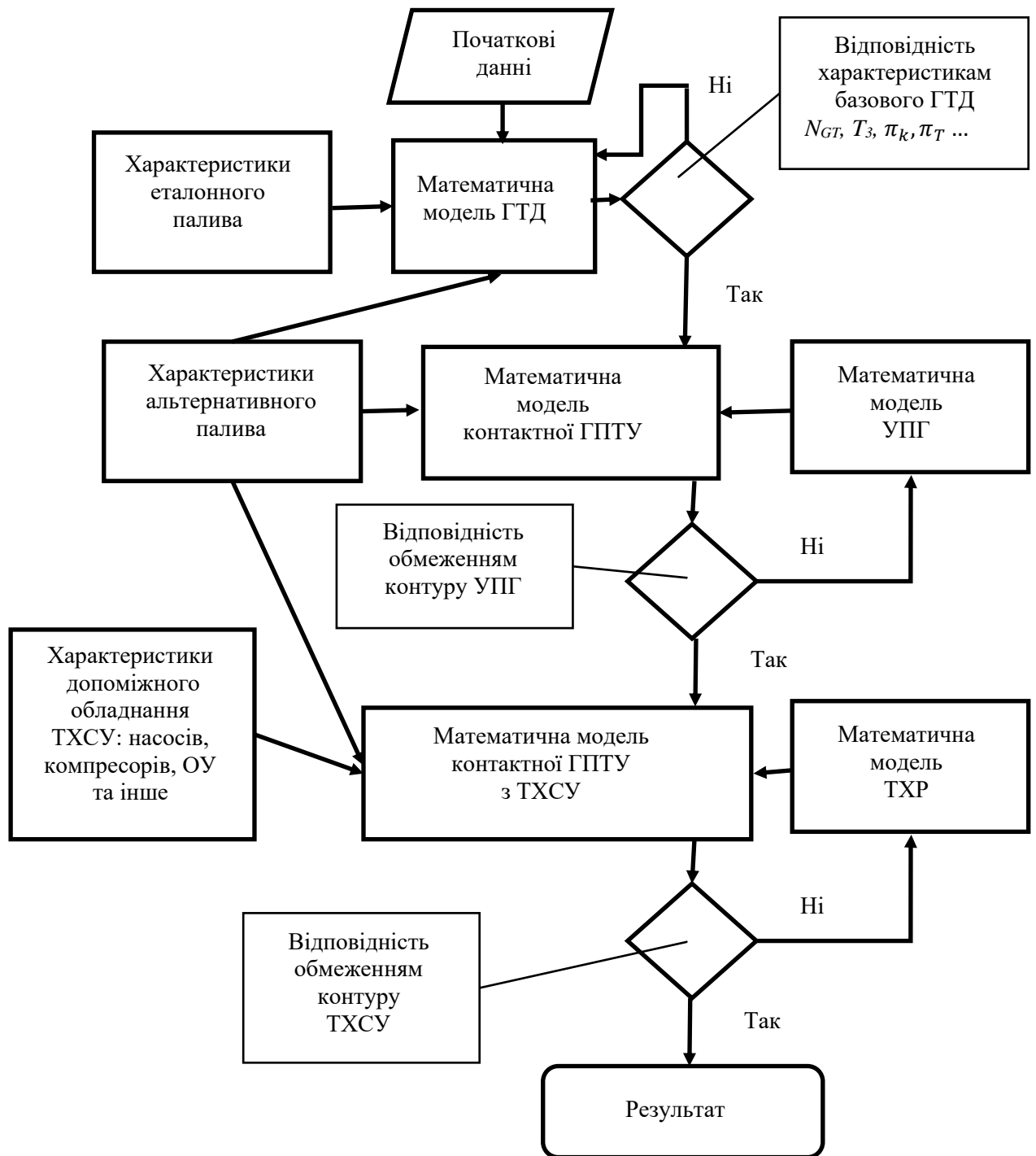


Рисунок 4.6 – Схема алгоритму моделювання процесів в енергетичному модулі з ТХСУ

На другому етапі розраховуються процеси в контактній газо-паротурбінній установці (ГПТУ), яка створена на базі моделі I етапу.

Визначаються:

- масова витрата альтернативного палива при фіксованому значенні потужності;
- паропродуктивність утилізаційного парогенератора (УПГ) в умовах обмежень мінімальної температури відпрацьованих газів на виході з парогенератора, яка визначається температурою точки роси;
- зміна масової витрати повітря з урахуванням дотримання допустимої температури газу за камерою згоряння;
- витрати механічної енергії на привід пристроїв зміни тиску (насосів), які забезпечують необхідну працездатність системи утилізації.

На третьому етапі моделюються процеси в контактній газо-паротурбінній установці з системою термохімічної обробки палива.

Визначаються:

- масова витрата альтернативного палива;
- максимальна досяжна температура процесу обробки палива в термохімічному реакторі (ТХР);
- паропродуктивність утилізаційного парогенератора в умовах обмежень мінімальної температури відпрацьованих газів на виході з парогенератора;
- зміна масової витрати повітря з урахуванням дотримання допустимої температури газу за камерою згоряння;
- витрати механічної енергії на привід пристроїв зміни тиску (насосів та компресорів), які забезпечують необхідну працездатність систем утилізації та термохімічної обробки палива;
- витрати енергії в опріснювальній установці.

Висновки за четвертим розділом

1. Розроблено математичну модель енергетичного модуля з термохімічною утилізацією вторинних енергоресурсів теплових двигунів, що враховує систему обмежень допустимих значень параметрів, у вигляді двох підсистем – енергетичної та термохімічної утилізації, які, в свою чергу, складаються з

структурно-функціональних блоків, поєднаних між собою зв'язками у вигляді матеріальних та енергетичних потоків.

2. Математичний опис процесів фізико-хімічних перетворень та розрахунок основних параметрів матеріальних та енергетичних потоків базується на балансових рівняннях, які замикаються додатковими співвідношеннями, що враховують особливості конкретного процесу. Визначення термодинамічних характеристик матеріальних потоків та параметрів робочих середовищ робочих тіл циклів спирається на закономірності фазової рівноваги.

3. Створені алгоритми забезпечують налаштування математичних моделей структурно-функціональних блоків, оптимізацію процесів термохімічних перетворень енергії та верифікацію розроблених моделей за показникам існуючих газотурбінних двигунів та установок.

Основні наукові результати розділу опубліковано в [57, 59, 61, 127, 155].

РОЗДІЛ 5

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МОДУЛІВ З ТЕРМОХІМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ

5.1 Теоретичні дослідження параметрів суднових енергетичних модулів з використанням термохімічної обробки палива

Утилізація вторинних енергоресурсів шляхом застосування термохімічних технологій надає можливість ефективного використання різних типів теплових двигунів у складі суднових енергетичних модулів [49, 50, 57, 59–63, 76, 122, 127, 128, 131, 156].

Ефективність та екологічність судна або морського об'єкту нафтогазовидобування, які оснащені енергетичним модулем з термохімічною системою, залежать, в першу чергу, від ступеня взаємодії його структурних складових – енергетичної підсистеми та підсистеми, в якій реалізовано термохімічні технології.

Головною складовою енергетичної підсистеми є група блоків, які утворюють тепловий двигун. Найчастіше застосування термохімічних технологій пов'язано з оснащенням базового двигуна підсистемою термохімічної обробки палива. Така обробка палива шляхом парової конверсії потребує підводу теплоти від зовнішнього джерела для здійснювання ендотермічних реакцій парового риформінгу та декомпозиції базового палива (детальніше див. підрозділ 3.3). При термохімічній утилізації таким джерелом є теплота вторинних енергоресурсів головного двигуна.

5.1.1 Газотурбінні енергетичні модулі з підсистемами термохімічної обробки палива

Для оцінки перспективності використання газотурбінних двигунів у складі

енергетичних модулів з термохімічними системами проведено математичне моделювання процесів термохімічної обробки базового палива за рахунок утилізації теплоти відпрацьованих газів ГТД. Це надає можливість верифікації математичної моделі ГТД по базовій конфігурації газотурбінного двигуна з подальшою адаптацією моделі до обмежень, пов'язаних з взаємним впливом енергетичної і термохімічної підсистем.

Для аналізу і оцінки ефективності використання термохімічних технологій в енергомодулі DF/GTE/EI на базі ГТД вітчизняного виробництва проведено тепловий проєктувальний розрахунок циклу газотурбінного агрегату.

В якості базового двигуна був обраний сучасний ГТД UGT 25000 номінальною потужністю на клеммах електрогенератора 25 МВт (за стандартними умовами).

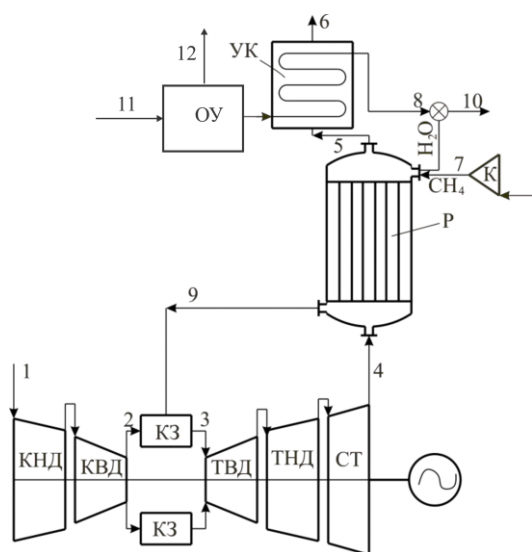
Вихідні дані для проведення розрахунків наведені нижче.

Температура навколишнього середовища, К	288
Тиск навколишнього середовища, МПа	0,1013
Механічний ККД роторів	0,995
Допустима температура лопаток турбіни, К	1080
Коефіцієнт повноти згоряння в КЗ	0,99
Адіабатичний ККД ступеня турбіни	0,88

Оцінка адекватності математичної моделі базового ГТД показала величину нев'язки теплового балансу не більше одного відсотка.

Схема енергомодуля DF/GTE/EI та основні параметри потоків в циклі надані на рис. 5.1. [49]. Принцип роботи полягає в наступному. До камери згоряння двигуна подається синтез-газ, який надходить з термохімічного реактора. В реакторі за рахунок теплоти відпрацьованих газів ГТД відбувається підігрів та подальший паровий риформінг метано-парової суміші. За реактором температура відпрацьованих газів має потенціал, якого достатньо для отримання в утилізаційному котлі пари, необхідної для здійснення парового риформінгу базового палива в реакторі. В енергомодулі, аналогічно контактним газо-

паротурбінним установкам, відбувається винесення пари з циклу [157]. Для компенсації втрат води передбачена опріснювальна установка (ОУ) [158].



Позначення потоку	Температура, К	Масова витрата, кг/с
1 (повітря)	288	86,910
2 (повітря)	690	86,910
3 (гази)	1450	90,000
4 (гази)	773	90,000
5 (гази)	738	90,000
6 (гази)	443	90,000
7 (метан)	415	1,454
8 (пара)	508	7,170
9 (синтез-газ)	700	3,100
10 (пара)	508	5,524
11 (морська вода)	293	9,680
12 (розсіл)	303	2,51

Рисунок 5.1 – Схема енергомодуля DF/GTE/EI з термохімічною обробкою палива на базі UGT 25000:

КНТ – компресор низького тиску; КВД – компресор високого тиску;
 КЗ – камера згоряння; ТВТ – турбіна високого тиску; ТНТ – турбіна низького тиску; СТ – силова турбіна; Р – реактор; УК – утилізаційний котел;
 К – компресор базового палива; ОУ – опріснювальна установка

В якості критерію ефективності прийнято коефіцієнт корисної дії енергомодуля

$$\eta = (Ne - \sum N_{\text{add}}) / (C_N \cdot H_U^B), \quad (5.1)$$

де Ne – механічна потужність на вихідному валу двигуна, кВт; $\sum N_{\text{add}}$ – витрати потужності на привід насосів, компресорів, на потреби ОУ та іншого обладнання підсистеми термохімічної обробки палива, кВт; C_N – секундна витрата палива, кг/с; H_U^B – нижча теплота згоряння базового палива, кДж/кг.

Застосування термохімічної обробки палива шляхом парового риформінгу приводить до наступних змін в базовому циклі:

- збільшення втрат повного тиску на виході з двигуна за рахунок втрат повного тиску в реакторі;

- збільшення кількості робочого тіла за рахунок подачі пари та синтез-газу до камери згоряння;

- утилізація теплоти відпрацьованих газів;

- витрати потужності на привід насосів і компресорів, на опріснювальну установку [159, 160] та інше допоміжне обладнання системи термохімічної утилізації.

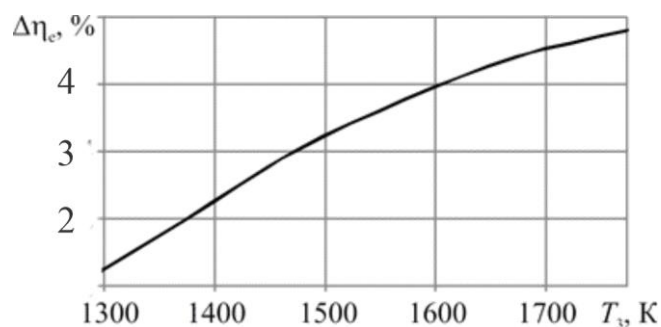
Збільшення загальних втрат повного тиску в газоповітряному тракті за рахунок додаткових втрат тиску в термохімічному реакторі призводить до зменшення ККД двигуна від 0,6 до 0,8 % (абсолютних) та зменшення питомої потужності від 1,6 до 2,2 % (більші значення відповідають меншим значенням температури T_3).

При розрахунку термохімічного реактора, який за схемою знаходиться відразу за ГТД, визначальним параметром є температура відпрацьованих газів двигуна.

Отримані результати свідчать про тенденцію зростання ККД при використанні термохімічної утилізації в порівнянні з базовим циклом. У розрахунку ККД не враховано зменшення внутрішніх втрат в камері згоряння, яке пов'язано з процесами окиснення, попередньо розкладеного на компоненти, базового вуглеводневого палива. Більш детально процеси в газотурбінній камері згоряння, що працює на продуктах термохімічної конверсії, розглянуто в розділі 6.

Аналіз результатів розрахунку циклу виявляє приріст ККД (рис. 5.2) у порівнянні з циклом STIG. Слід припустити, що синтез-газ здатний більшою мірою стабілізувати горіння, ніж паро-паливна суміш, яку використовують в циклі STIG.

Рисунок 5.2 – Залежності приросту
ККД відносно циклу STIG від
температури за камерою згоряння
 T_3



В результаті протікання ендотермічних реакцій в реакторі від відпрацьованих газів відбирається кількість теплоти, яка необхідна для підігріву метано-парової суміші та проведення цих реакцій. Для двигуна UGT 25000 при заданих параметрах частина утилізованої теплоти становить $Q = f(\Delta T, G_G, c_p) = 29 \%$ від теплоти відхідних газів. В загальному тепловому балансі це дозволяє зменшити теплоту, яка вноситься в цикл базовим паливом, на 4,9 %.

Витрати потужності на потреби опріснювальної установки складають від 0,7 до 1,0% від потужності енергетичного модулю та залежать від відношення пара/попутний газ .

Отримані методами математичного моделювання показники ефективності газотурбінного енергетичного модуля з системою термохімічної обробки метану показують, що при існуючому рівні температур газів за камерою згоряння парова конверсія метану за рахунок теплоти відпрацьованих газів недостатньо ефективна, і її можна порівняти за результатами з циклом STIG. Це збігається з результатами інших дослідників [48]. Безсумнівною перевагою термохімічної обробки палива є те, що синтез-газ здатний в більшій мірі стабілізувати горіння, ніж паро-паливна суміш, яку отримують в результаті циклу STIG.

За даними розрахунків приріст ККД становить від 1,0 до 4,6 % в залежності від температури T_3 , яка, у кінцевому підсумку, і визначає ступінь конверсії метану в термохімічному реакторі.

За результатами дослідження можливо зробити висновок, що розглянута схема енергомодуля конфігурації DF/GTE/EI з термохімічною обробкою палива на базі серійного вітчизняного ГТД простого циклу може бути перспективною

при використанні таких палив як метанол, етанол та попутний газ з високим вмістом важких вуглеводнів.

Помірна температура відпрацьованих газів ГТД істотно звужує діапазон застосування ТХУ в судновій енергетиці. Перспективним може бути варіант з установкою термохімічного реактора між турбінами, як це розглянуто в [48, 161].

Такий варіант був досліджений при аналізі ефективності енергокомплексу потужністю 10–15 МВт для морської бурової платформи. В якості палива приймався попутний нафтовий газ (табл. 2.6, варіант Т1).

В якості базових параметрів прийняті характеристики ГТД Siemens SGT 400 (табл. 5.1).

Моделювання проводилося при варіюванні відношення пара/попутний газ і наступних обмеженнях:

- фіксована потужність ГТД (13,5 МВт);
- фіксована температура газу перед турбіною ($T_3 = 1524 \text{ K}$);
- параметри навколишнього середовища згідно ISO 19859: 2016;
- температура газу за парогенератором приймалася вище температури точки роси згідно з рекомендаціями [162].

Таблиця 5.1 – Характеристики ГТД Siemens SGT 400

Характеристики	Значення
Кількість компресорів, n_k	1
Кількість турбін, n_t	2
Температура газів перед ТВД, T_3	1524 К
Міра підвищення тиску в циклі, π_k	16,8-18,9
Витрата відпрацьованих газів, G_{gas}	39,4-44,0 кг/с
Температура відпрацьованих газів, T_4	813-828 К
Потужність ГТД, N_e	12,9-14,3 МВт
Ефективний ККД, η	34,8-35,4 %

В якості критерію ефективності прийнято коефіцієнт корисної дії енергомодуля (5.1).

В якості критерію ефективності термохімічної конверсії вуглеводнів, що містяться в попутному газі, прийнято ступінь конверсії відповідного вуглеводню (етан, пропан, бутан, пентан).

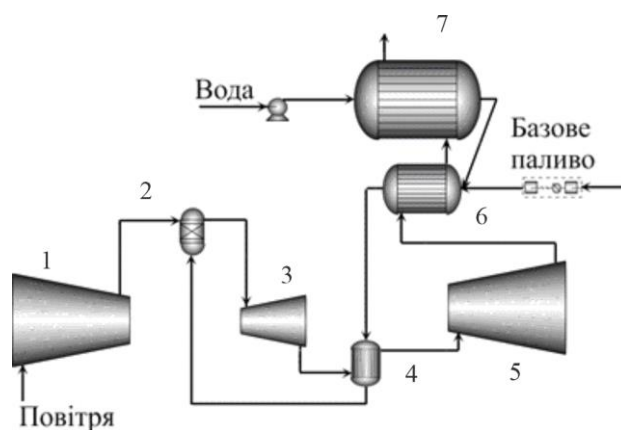
Ступінь конверсії визначалася згідно (3.24).

Розрахункова схема енергомодуля представлена на рис. 5.3. Опріснювальна установка на рисунку не показана. Математичне моделювання процесів дозволило порівняти ефективність різних схемних рішень. Виявлено, що найбільш ефективною є схема з двоступінчастим реактором – риформером парової конверсії попутного газу (ПГ).

Рисунок 5.3 – Схема енергомодуля

DF/GTE/EI з термохімічною
обробкою палива:

- 1 – компресор; 2 – камера згоряння;
- 3 – турбіна компресору;
- 4 – реактор 2 ст.; 5 – силова турбіна;
- 6 – реактор 1 ст.; 7 – утилізаційний парогенератор



При базових параметрах ГТД SGT 400 ККД установки лежить в діапазоні 46-50 % та залежить від складу попутного газу та допустимого відношення пара/попутний газ, яке складає 6 - 7. Приріст ККД відносно контактної газопаротурбінної установки на базі SGT 400 становить 4,2 %.

Аналіз отриманих результатів показує, що в результаті конверсії попутного газу при таких умовах вміст вуглецю в паливі знижується на 30 %. Розрахунок процесів термохімічної конверсії показав практично повну конверсію вуглеводнів (рис. 5.4).

З метою визначення впливу термохімічної обробки на викиди вуглекислого газу CO_2 , який утворюється при спалюванні палива, виконано розрахунок вмісту вуглецю в синтез-газі (СГ) за методикою (3.25). Розрахунок показав суттєве зменшення (на 35 %) цього показника, який безпосередньо впливає на індекс енергетичної ефективності судна EEDI.

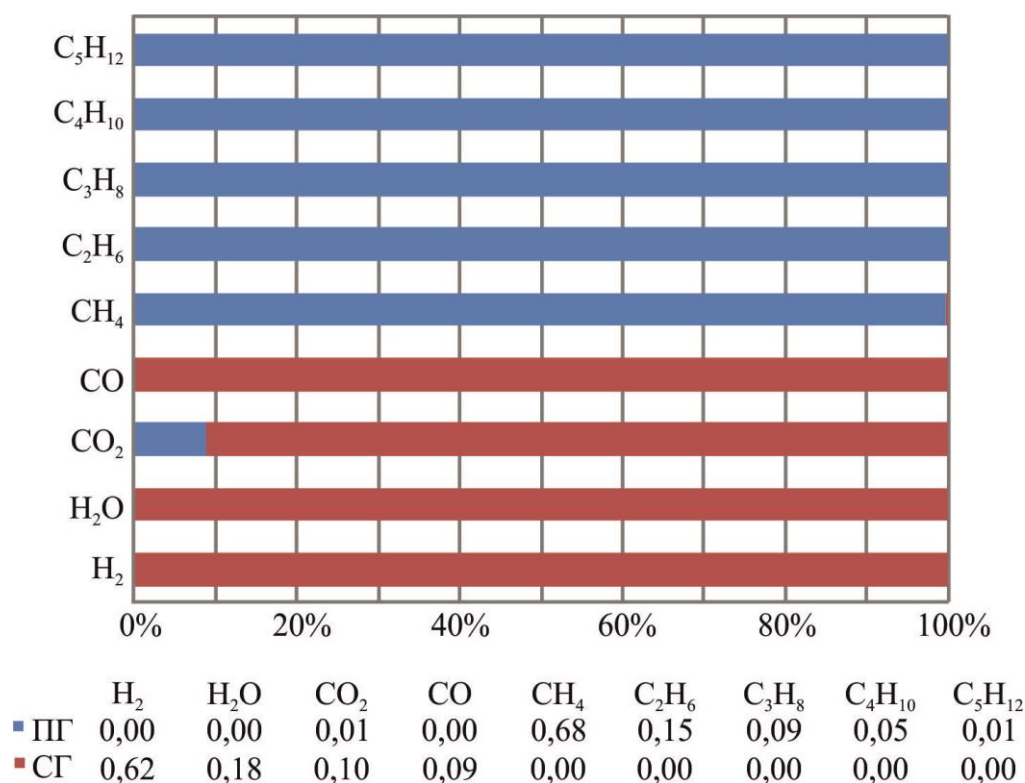


Рисунок 5.4 – Зіставлення складу (мольні частки) попутного газу та отриманого в результаті конверсії синтез-газу

Подальші дослідження виявили перспективність застосування даної схеми при використанні таких палив, як природний газ, етан, пропан, бутан. У табл. 5.2 представлено результати розрахунку вмісту вуглецю в синтез-газі, який був отримано термохімічною обробкою палива в енергокомплексі на базі ГТД Siemens SGT 400.

Застосування газотурбінних енергомодулів з термохімічною обробкою палива для високотехнологічних суден дозволяє забезпечити необхідну енергетичну їх ефективність згідно перспективних вимог ІМО.

В процесі визначення перспективних схем судових енергомодулів слід враховувати, що газотурбінні двигуни енергетичних установок мобільних об'єктів відрізняються від ГТД стаціонарних енергетичних установок більш жорсткими вимогами не тільки до масогабаритних параметрів, а ще й до характеристик надійності. Це тягне за собою відносне зниження ККД двигуна та обмеження по температурі газу перед турбіною. Одним із шляхів вирішення проблеми створення вискоефективного судового газотурбінного

енергомодуля може бути використання ГТД складної теплової схеми.

Таблиця 5.2 – Вміст вуглецю в синтез-газі при термохімічній обробці палива в енергокомплексі на базі ГТД Siemens SGT 400

Компонент	Базове паливо			
	LNG (Heavy)	Етан	Пропан	Бутан
	Мольні частки			
CO	0,00655	0,0014	0,0111	0,0119
CO ₂	0,13345	0,1474	0,1864	0,2037
CH ₄	0,36930	0,6637	0,5400	0,5316
H ₂	0,48840	0,1875	0,2625	0,2528
N ₂	0,00224	—	—	—
Вміст вуглецю в синтез-газі				
	0,488	0,5621	0,5079	0,4964
Зменшення вмісту вуглецю, %				
	34,9	29,6	37,8	39,9

У практиці проектування енергетичних модулів на базі ГТД складних теплових схем найбільшого поширення набув спосіб регенерації теплоти відхідних газів шляхом введення в схему теплообмінника-регенератора для підігріву повітря перед камерою згоряння [163]. Регенерація теплоти відпрацьованих газів в теплообміннику-регенераторі дозволяє при помірних температурах газу перед турбіною $T_3 = 1300\text{--}1400\text{ K}$ та мірі підвищення тиску $\pi_k = 6\text{--}10$ забезпечити значення ККД ГТД не менш 40–41 % [164], а при більш високих значеннях T_3 до 45 %.

Аналіз взаємозв'язків термодинамічних параметрів газотурбінного енергомодуля конфігурації DF/GTR/EI з термохімічною обробкою палива був виконано з використанням розробленої моделі. В її основу покладено залежності укрупненого розрахунку ГТД [152] з урахуванням втрат повного тиску всіх елементів газоповітряного тракту та відборів повітря на охолодження лопаток турбін. Зміну нижчої теплотворної здатності палива в результаті конверсії враховано коефіцієнтом збільшення теплоти згоряння базового палива, який

розглянуто у вигляді (3.23).

Як і в попередньому дослідженні, витрати теплоти відпрацьованих газів, які необхідні для здійснення конверсії палива, визначено рівнянням теплового балансу термохімічного реактора (3.33).

Згідно підходів, які були сформовані в розділі 3, регенеративний ГТД був розглянутий у вигляді групи блоків. Позначивши основні блоки ГТД як ТС (турбокомпресор), R (регенератор) та додавши до них блок підсистеми термохімічної обробки палива (TCR -термохімічний реактор), отримуємо дві можливих конструктивні схеми енергомодуля з послідовним розміщенням елементів [131]:

- I – TC–R–TCR;
- II – TC–TCR–R.

Перший варіант енергомодуля DF/GTR/EI передбачає традиційну схему регенеративного ГТД та установку за ним блока TCR (рис. 5.5,*a*).

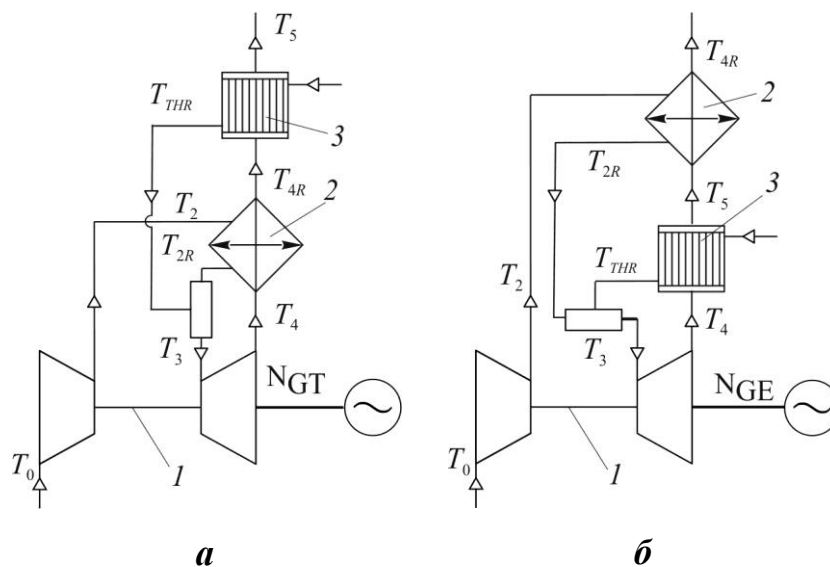


Рисунок 5.5 – Варіанти схемних рішень енергомодуля DF/GTR/EI з термохімічною обробкою палива:

a – схема TC–R–TCR; *б* – схема TC–TCR–R;
1 – блок ТС; *2* – блок R; *3* – блок TCR

В такій схемі парогазова суміш (яка має досить високу температуру) після реактора подається до камери згоряння, як в циклі STIG. Газопарова суміш розширюється в турбіні, проходить крізь регенератор, підігріваючи циклове

повітря, потім потрапляє в термохімічний реактор, віддаючи теплоту при ендотермічних реакціях (D), (SR) і далі надходить до утилізаційного парогенератора (на схемі не показаний).

Альтернативний варіант енергомодуля DF/GTR/EI за схемою TC–TCR–R передбачає послідовне розміщення за турбокомпресорним блоком термохімічного реактора та регенератора (рис. 5.5,б).

Для кожного варіанту енергомодуля DF/GTR/EI визначено залежності питомої витрати палива та максимальної допустимої температури процесу конверсії від міри підвищення тиску турбокомпресору π_k та середньомасової температури газів на виході з камери згоряння T_3 .

Максимальна допустима температура реакції конверсії палива T_{THR} визначена відповідно для схем TC–R–TCR та TC–TCR–R як:

$$T_{THR} = T_{4R} - \Delta T \quad \text{та} \quad T_{THR} = T_4 - \Delta T, \quad (5.2)$$

де T_{4R} – температура газу за регенератором; T_4 – температура газу за ГТД.

Дослідження ефективності енергомодулів різних конструктивних схем виконано на базі ГТД вітчизняного виробництва UGT16000 потужністю 16 МВт [22]. Ступінь термодинамічної регенерації прийнята близькою до гранично можливої $R = 0,85$ [152, 164]. В якості базового палива розглядався метан.

З результатів розрахунку видно, що для енергомодуля схеми TC–R–TCR при $T_3 = 1300$ К допустима температура процесу конверсії палива не перевищує 530 К (при $\bar{H}_U = 0,2$) (рис. 5.6,а).

При збільшенні T_3 до 1500 К температура конверсії підвищиться до 580 К при тому ж ступені конверсії базового палива. Такі значення температур конверсії істотно обмежують вибір базового палива, яке може бути використано в енергомодулі. Так, діапазон температур задовільної конверсії¹ для метану складає 870–1070 К, а етанолу – не менш 670–770 К, що практично унеможливорює використання цих палив в енергомодулі такої схеми.

¹ Діапазони температур визначено за умов використання констант рівноваги основних реакцій при тиску 0,1 МПа/

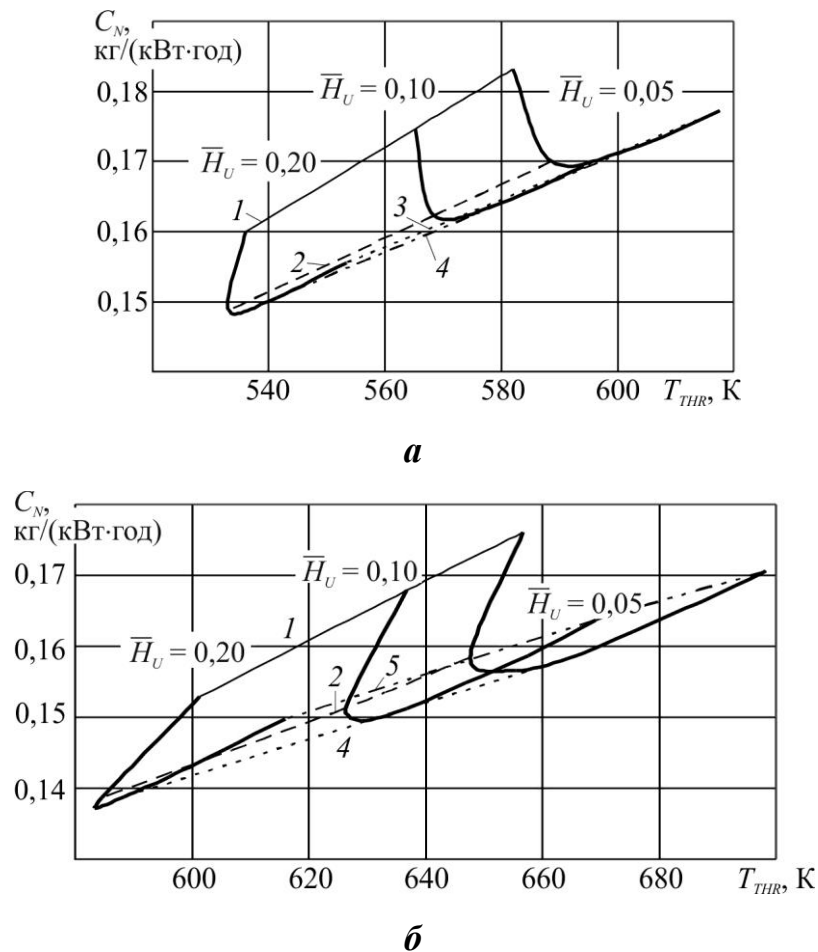


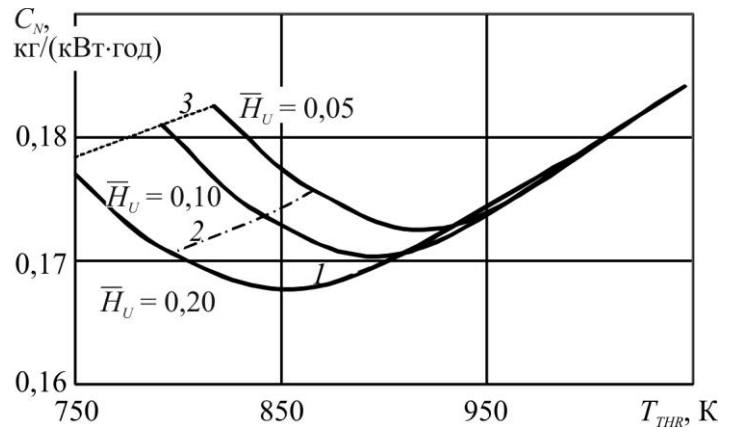
Рисунок 5.6 – Показники енергомодуля схеми ТС–R–ТСR:

a – $T_3 = 1300$ К; *б* – $T_3 = 1500$ К;

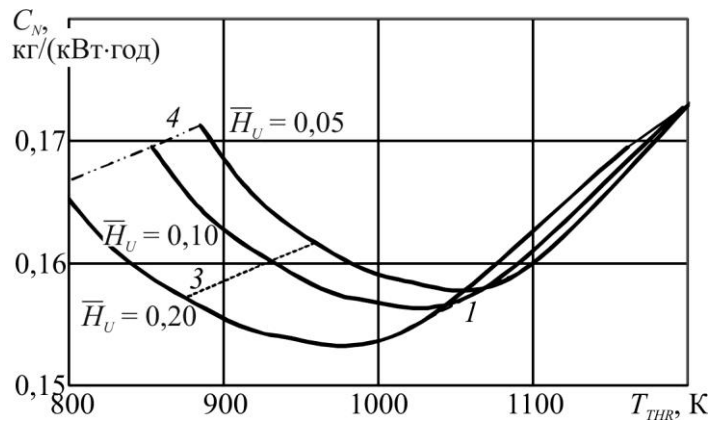
1 – $\pi_k = 3$; 2 – $\pi_k = 5$; 3 – $\pi_k = 7$; 4 – $\pi_k = 9$; 5 – $\pi_k = 15$

У той же час, допустимо застосування метанолу, конверсія якого характеризується діапазоном температур 570–620 К та диметилового ефіру з подібним температурним діапазоном ефективної конверсії.

Для конструктивної схеми II допустима температура процесу конверсії суттєво вище (рис. 5.7). Її величина досягає значення близько 850 К при $T_3 = 1300$ К, збільшуючись до 980–1000 К при $T_3 = 1500$ К ($\bar{H}_U = 0,2$). Це дозволяє використовувати в такій схемі метан та інші вуглеводневі палива, а також етанол.



a



б

Рисунок 5.7 – Показники енергомодуля схеми TC–TCR–R:

a – $T_3 = 1300$ К; **б** – $T_3 = 1500$ К; 1 – $\pi_k = 5$; 2 – $\pi_k = 7$; 3 – $\pi_k = 9$; 4 – $\pi_k = 13$

Слід зазначити, що істотне підвищення (на 10–12 %.) величини питомої витрати палива в енергомодулі за схемою TC–TCR–R пов'язано зі зниженням коефіцієнта корисної дії регенеративного ГТД внаслідок зменшення величини підігріву повітря в регенераторі (рис. 5.8).

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

– схема газотурбінного енергомодуля з послідовно розміщеними за турбокомпресорним блоком термохімічним реактором та регенератором дозволяє розширити діапазон температур конверсії палива до 980–1000 К, але характеризується гіршими показниками енергетичної ефективності;

– схема газотурбінного енергомодуля з розміщеними послідовно за турбокомпресорним блоком регенератором та термохімічним реактором характеризується відносно низькою потенційною температурою для проведення реакції (530–580 К) та істотно обмежує можливості вибору палив.

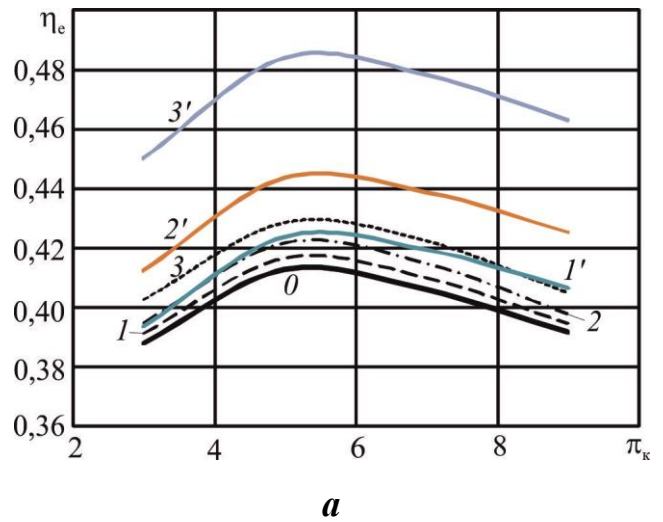
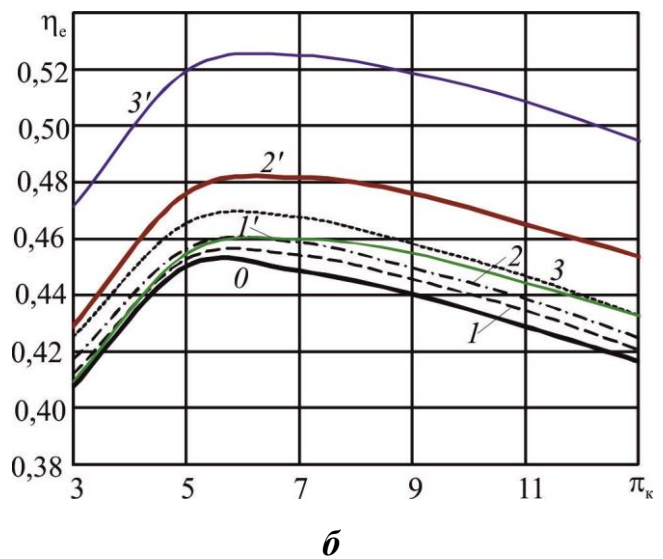


Рисунок 5.8 – Коефіцієнт корисної дії енергомодуля:

a – $T_3 = 1300$ К; *б* – $T_3 = 1500$ К; *0* – $\bar{H}_U = 0$; за схемою TC-TCR-R: *1* – $\bar{H}_U = 0,05$; *2* – $\bar{H}_U = 0,1$; *3* – $\bar{H}_U = 0,2$;
за схемою TC-R-TCR: *1'* – $\bar{H}_U = 0,05$; *2'* – $\bar{H}_U = 0,1$; *3'* – $\bar{H}_U = 0,2$



Найбільш привабливим варіантом базового палива для такої схеми енергомодуля є метанол. Незважаючи на те, що метанол є паливом з низьким вмістом вуглецю, невелика нижча теплотворна здатність стримує ефективність його застосування в якості палива для суднових енергетичних модулів. Парова конверсія дозволяє отримати газове паливо з кращими енергетичними та екологічними характеристиками в порівнянні з базовим.

У розділі 3 наведено результати оцінки впливу тиску процесу на ефективність конверсії метанолу. Згідно з отриманими результатами зростання тиску приводить до зміщення області ефективності конверсії в зону більш високих температур. Аналіз параметрів регенеративних ГТД дозволяє висунути припущення, що завдяки низькій мірі підвищення тиску в таких двигунах, вплив тиску на ефективність конверсії метанолу буде незначним.

Детальне дослідження параметрів енергомодуля DF/GTR/EI структурної схеми TC–R–TCR виконано на базі регенеративного ГТД виробництва «Зоря»–«Машпроект» типу UGT3200RG [165]. Двигун призначений для приводу генератора і може використовуватися в складі суднового пропульсивного комплексу з електрорухом, що відповідає конфігурації модуля. Ступінь регенерації прийнята за прототипом та близькою до гранично можливої, так як подальше збільшення супроводжується значним зростанням поверхні теплообміну. Температура газу перед турбіною також прийнята за прототип за даними базової конструкції. Схема являє собою регенеративний газотурбінний двигун з підсистемою термохімічної обробки палива.

В основу математичної моделі енергомодуля DF/GTR/EI структурної схеми TC–R–TCR покладено залежності укрупненого розрахунку регенеративного ГТД [152] з урахуванням втрат повного тиску всіх елементів газоповітряного тракту та відборів повітря на охолодження лопаток турбіни. Для визначення гідравлічних опорів проведено моделювання процесів в теплообмінних апаратах при заданих параметрах. Модель камери згоряння заснована на допущенні комбінованої хімічної та фазової рівноваги, при цьому для визначення компонентного складу виконується мінімізація вільної енергії Гіббса для продуктів реакції [166, 167]. Витрати теплоти відпрацьованих газів, які необхідні для здійснення конверсії палива, визначаються тепловим балансом термохімічного реактора (3.33). Модель термохімічного реактора є двохкомпонентною та містить два послідовно встановлених блоки.

Моделювання проводилося для зазначених в табл. 5.3 параметрах базового турбокомпресорного блоку при наступних обмеженнях:

- фіксована потужність ГТД (3400 кВт);
- фіксована температура газу перед турбіною ($T_3 = 1270$ K);
- параметри навколишнього середовища відповідно до ISO 19859:2016.

В якості критерію ефективності прийнято коефіцієнт корисної дії енергомодуля, який визначається за рівнянням (5.1).

- температура газу за регенератором в діапазоні 580-620 К (діапазон визначався мінімальною ефективною температурою в термохімічному реакторі та заданим ступенем регенерації).

Таблиця 5.4 – Параметри робочих середовищ енергомодуля DF/GTR/EI структурної схеми TC–R–TCR

Точка контролю	Температура середовища, К	Тиск середовища, МПа	Масова витрата, кг/с
1	288	0,101	16,00
2	546	0,709	16,00
3	1251	0,672	12,17
4	787	0,114	17,09
5	753	0,702	12,17
6	604	0,109	17,09
7	584	1,000	1,09
8	588	0,105	17,09
9	451	0,101	17,09
10	288	0,101	0,40
11	288	0,101	0,69

Моделювання процесів в енергомодулі показало, що зростання ККД дорівнює 4 % по відношенню до параметрів базового двигуна, який працює на метанолі. Виявлено, що оптимальне мольне відношення вода / метанол для даних параметрів схеми становить 3 (рис. 5.10).

Дослідження дозволило знайти значення температур, які визначають робочі процеси циклу (рис. 5.11).

Проведено розрахунок вмісту вуглецю в отриманому синтез-газі (за сухими компонентами CH_4 , CO_2 , CO) за формулою (3.25).

Відповідно до отриманих результатів, вміст вуглецю в паливі склав приблизно 0,892 т CO_2 /т метанолу. В цілому, термохімічна регенерація скидної

теплоти шляхом парової конверсії метанолу в судновому енергомодулі DF/GTR/EI структурної схеми TC-R-TCR дозволила поліпшити показник EEDI в 1,54 рази.

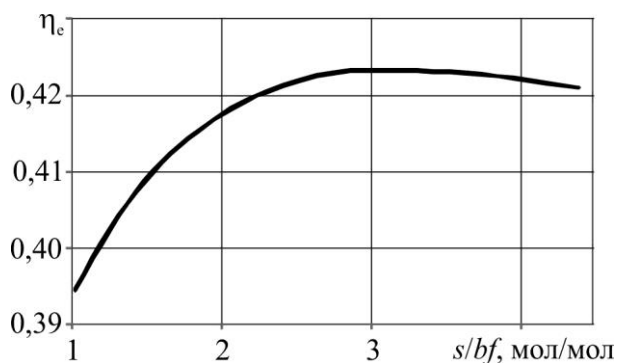


Рисунок 5.10 – Вплив відношення вода/метанол на ККД енергомодуля за умов фіксованих параметрів турбокомпресора та потужності двигуна

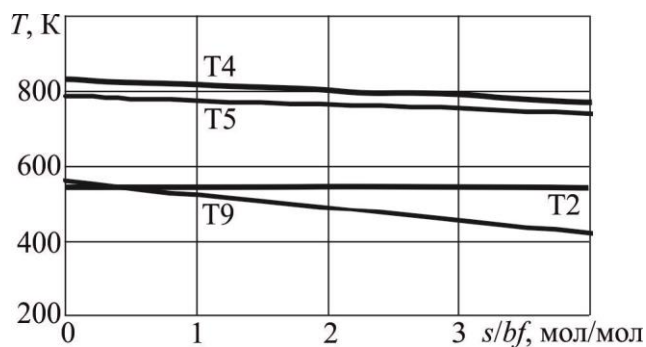


Рисунок 5.11 – Вплив відношення вода/метанол на температури регенеративного циклу за умови фіксованої потужності двигуна

Проведене дослідження дозволило виявити резерви підвищення ефективності використання метанолу як палива для теплових двигунів суднових енергетичних модулів.

Визначено вплив тиску на температурний діапазон ефективної конверсії метанолу та встановлено, що параметри регенеративного газотурбінного двигуна відповідають цьому діапазону.

Дослідження впливу тиску на процес конверсії базових палив, результати яких надані у розділі 3 та збігаються з результатами досліджень інших авторів, дозволили встановити, що зростання тиску процесу приводить до зростання температури, яка необхідна для ефективної конверсії.

У той же час, для організації робочих процесів в камері згоряння газотурбінного двигуна тиск підведення палива в форсунку має перевищувати тиск повітря за компресором. Це визначило необхідність дослідження впливу енергетичних витрат на стискання синтез-газу перед подачею в камеру згоряння та визначення ефективності конверсії при різних тисках в реакторі.

Принципово можлива реалізація двох конструктивних схем підсистеми

термохімічної обробки палива.

Перша конструктивна схема передбачає проведення в термохімічному реакторі парової конверсії базового палива при тисках, близьких до атмосферного, з подальшою дегідратацією отриманого синтез-газу. Для організації процесу в камері згоряння ГТД осушений синтез-газ повинен бути стиснутий компресором до номінального тиску подачі палива в форсунці (вище тиску за компресором ГТД). Переваги – зміщення діапазону ефективної конверсії в область відносно низьких температур; осушений синтез-газ має значно менший вміст негорючих компонентів, що істотно спрощує процеси сумішоутворення і спалювання в камері згоряння. Недоліки – втрата теплового потенціалу парогазової суміші при дегідратації синтез-газу, значні енерговитрати на привід компресора подачі газу.

На рис. 5.12,*а* показана схема енергомодуля DF/GTE/EI (на базі ГТД простого циклу) з термохімічним реактором низького тиску (TCR LP).

В наступній конструктивній схемі термохімічної обробки палива запропоновано проведення конверсії при тисках, відповідних тиску підведення палива в форсунку[170]. Переваги – використання теплового потенціалу парогазової суміші, яка після реактора має досить високу температуру та подається в камеру згоряння як і в циклі STIG. Недоліки – зміщення діапазону ефективної конверсії в область відносно високих температур. На рис. 5.12,*б* показано схему енергомодуля DF/GTR/EI (на базі ГТД регенеративного циклу) з термохімічним реактором високого тиску (TCR HP).

З метою вибору найбільш ефективної схеми підсистеми термохімічної обробки палива проведено відповідне теоретичне дослідження.

В якості базових параметрів прийнято характеристики ГТД UGT2500 та UGT3200RG виробництва «Зоря»–«Машпроект», призначені для приводу генераторів. Основні характеристики базових двигунів при роботі на природному газі наведені в табл. 5.5 [168].

Математична модель турбокомпресорного блоку базується на залежностях укрупненого розрахунку ГТД [152] з урахуванням втрат повного тиску в усіх

елементах газоповітряного тракту і відбору повітря на охолодження лопаток турбіни. Модель камери згоряння передбачає допущення про комбіновану хімічну та фазову рівновагу. Компонентний склад продуктів реакцій визначається за умов мінімізації вільної енергії Гіббса.

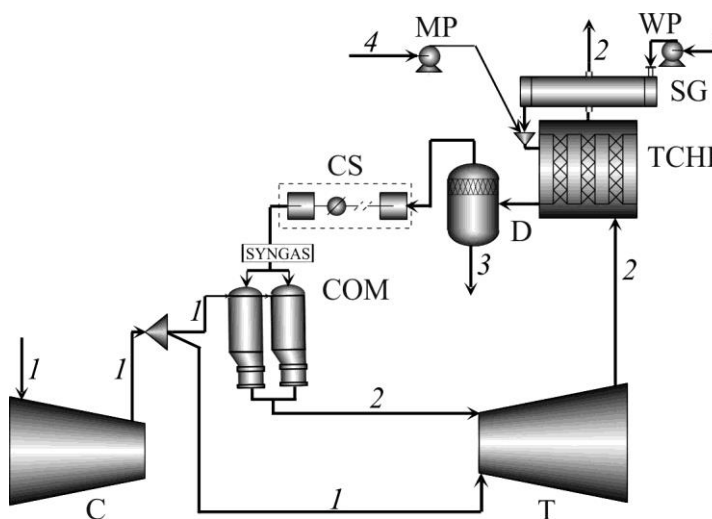
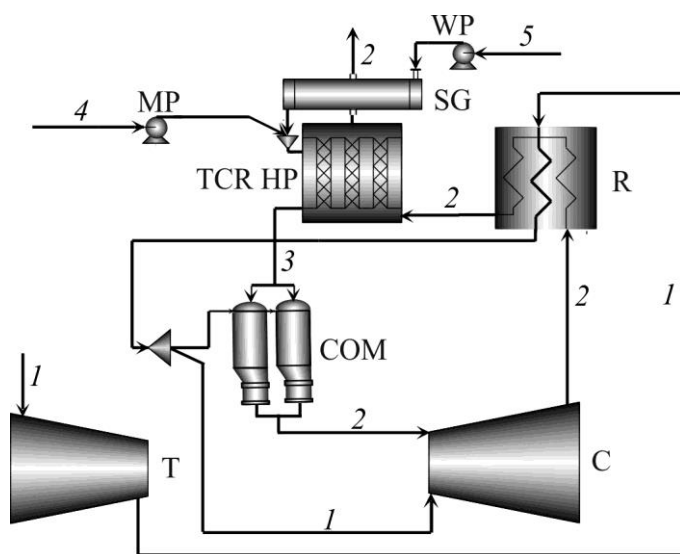


Рисунок 5.12 – Схеми енергомодулів DF/GTE/EI з термохімічним реактором TCR LP (а) та DF/GTR/EI з термохімічним реактором TCR HP (б):

С – компресор; Т – турбіна; COM – камера згоряння; TCR – реактор; R – регенератор; SG – парогенератор; WP – насос подачі води; MP – насос подачі метанолу; D – дегідратор; CS – компресор синтез-газу; 1 – повітря; 2 – гази; 3 – синтез-газ; 4 – метанол; 5 – вода



б

Ефективність конверсії метанолу визначається потенціалом теплоти відхідних газів, і розраховується з урахуванням теплового балансу термохімічного реактора. Як і в попередньому розрахунку, модель реактора виконана двохкомпонентною.

Моделювання проводилося для зазначених в табл. 5.5 параметрах базових турбокомпресорних блоків при наступних обмеженнях:

- фіксована витрата палива;
- фіксована температура газу перед турбіною;
- параметри навколишнього середовища відповідають ISO 19859–2016.

Таблиця 5.5 – Основні характеристики ГТД UGT 2500 та UGT 3200RG

Параметр	UGT 2500	UGT 3200RG
Потужність, МВт	2,85	3,40
Витрата повітря, кг/с	14,9	16
Міра підвищення тиску	12	7
Ступінь регенерації	–	0,85
Температура газу за регенератором, К	1224	

Як критерій ефективності прийнято відношення потужності енергомодуля з підсистемою ТХУ до потужності базового двигуна, яке визначається як

$$C_{ef} = (N_e - \sum N_{add}) / N_{e\ base}, \quad (5.3)$$

де N_e – механічна потужність на вихідному валу газотурбінного двигуна енергомодуля, кВт; $\sum N_{add}$ – сумарні затрати потужності на привід насосів подачі води, метанолу та компресор синтез-газу, кВт; $N_{e\ base}$ – механічна потужність на вихідному валу базового газотурбінного двигуна за умови фіксованої подачі метанолу, яка відповідає 100 % навантаженню, кВт.

Результати моделювання дозволили порівняти енергетичні витрати на стискання осушеного синтез-газу (схема рис. 5.12,*а*) та вплив тиску в реакторі p_{THR} на ефективність конверсії метанолу (схема рис. 5.12,*б*). На рис. 5.13 показано зміну вихідної потужності енергомодуля (за відрахуванням витрат енергії на привід насосів та компресорів) для різних конструктивних схем підсистеми термохімічної обробки палива.

За результатами досліджень виявлено, що схема на рис. 5.12,*а* є неефективною, тому що витрати енергії на стиснення осушеного синтез-газу перевищують зростання енергоефективності за рахунок парової конверсії метанолу. В результаті ККД установки рис. 5.12,*а* нижче ніж в базовому ГТД без

термохімічної обробки палива. У схемі рис. 5.12,б парогазова суміш після реактора, яка має досить високу температуру, подається в камеру згоряння, як в циклі STIG. Застосування такої схеми підвищує енергоефективність установки в порівнянні з базовою на 3–5 %, а для більш високих температур конверсії або каталітичних реакторів – до 10–11 %.

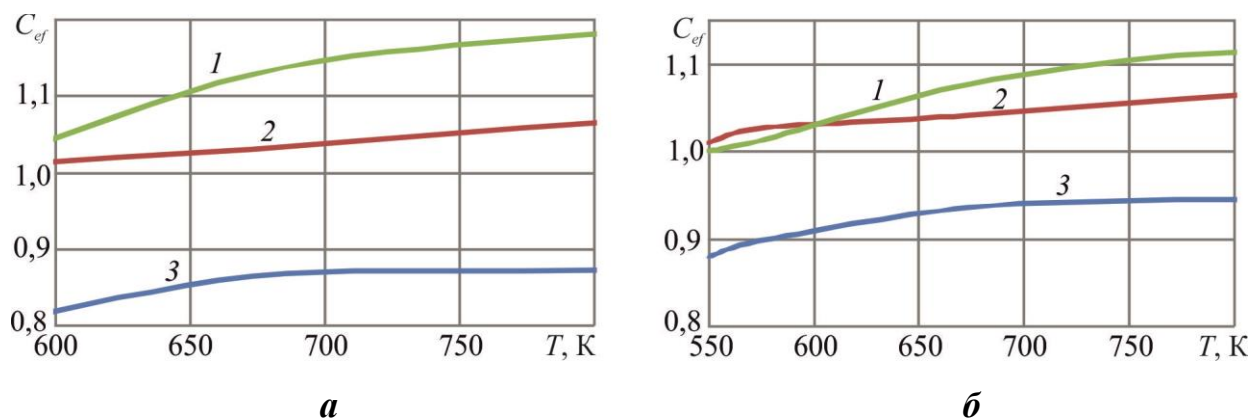


Рисунок 5.13 – Зміна корисної потужності енергомодулів DF/GTE/El на базі UGT 2500(*а*) та DF/GTR/El на базі UGT 3200RG (*б*):

1 – $p_{THR} = 0,2$ МПа, без урахування витрат енергії на привід компресора синтез-газу; 2 – $p_{THR} = 2$ МПа для UGT 2500 $p_{THR} = 1$ МПа для UGT3200RG; 3 – $p_{THR} = 0,2$ МПа

Аналіз ефективності регенеративних газотурбінних двигунів у складі енергомодулів з термохімічною обробкою палива встановив ї проблему, яка може стримувати використання такого ГТД у складі мобільних енергетичних комплексів.

Традиційна реалізація регенеративної схеми ГТД призводить до порушення прямотечійності газоповітряного тракту, появи нерівномірності потоків робочих середовищ, що викликають зростання втрат повного тиску та потенційні їх витрати. Досягнення високих значень ступеня регенерації пов'язано зі зниженням температурних напорів в теплообміннику і призводить до істотного збільшення площі поверхні теплообміну. Застосування компактних регенераторів пластинчастого типу стримується труднощами розв'язання питань міцності із-за великих температурних напружень. Значне підвищення маси регенеративної установки Rolls-Royce WR 21 свідчить на користь цього. Теплообмінники трубчастого типу вільні від цих проблем, але характеризуються недостатньою

компактністю. Попередня розробка показала, що для ГТД з гладкотрубним регенератором «котельного» типу [168] відношення потужність/об'єм складає близько 5 кВт/м³. Дуже низька величина об'ємної енергонасиченості не відповідає вимогам, що пред'являються до суднових енергомодулів.

Застосування регенератора з проміжним теплоносієм (ПТН) – комплексу з двох теплообмінників трубчастого типу (з можливістю оребрення), передача енергії між якими здійснюється ПТН дозволяє мінімізувати габарити теплообмінників, знизити втрати повного тиску, але ускладнює схему [28, 29]. Перенесення теплоти раціонально здійснювати проміжним рідинно-металевим теплоносієм [171, 172].

Відомі рекомендації щодо вибору параметрів регенератора ГТД з проміжним теплоносієм. Так, для визначення оптимальних умов роботи теплообмінників з ПТН запропоновано наступне співвідношення площ поверхонь теплообміну [172]

$$\frac{0,75}{k_{t1} / k_{t2}} < \frac{F_1}{F_2} < \frac{2,00}{k_{t1} / k_{t2}}, \quad (5.4)$$

де F_1 , F_2 та k_{t1} , k_{t2} – площі поверхонь та коефіцієнти теплопередачі по «холодній» та «гарячій» сторонах.

При допущенні про постійність коефіцієнтів теплопередачі в теплообмінному апараті, який складається з двох теплообмінників з площами поверхонь F_1 і F_2 , рекомендовано співвідношення їх площ [173]

$$\frac{F_1}{F_2} = \sqrt{\frac{k_{t2}}{k_{t1}}}. \quad (5.5)$$

В реальних умовах проектування регенеративного ГТД з заданим ККД такі підходи можуть бути не завжди коректними, оскільки не враховують взаємозв'язок гідравлічних втрат в теплообмінниках та ефективності ГТД.

Моделювання надало можливість встановити вплив параметрів контуру проміжного теплоносія на габарити регенеративного ГТД заданої ефективності [174-179].

На рис. 5.14 приведена розрахункова схема теплообмінних апаратів

регенеративного ГТД з контуром переносу теплоти проміжним теплоносієм (ПТН) між теплообмінником газівідводу (ТГВ) та теплообмінником компресора (ТКО).

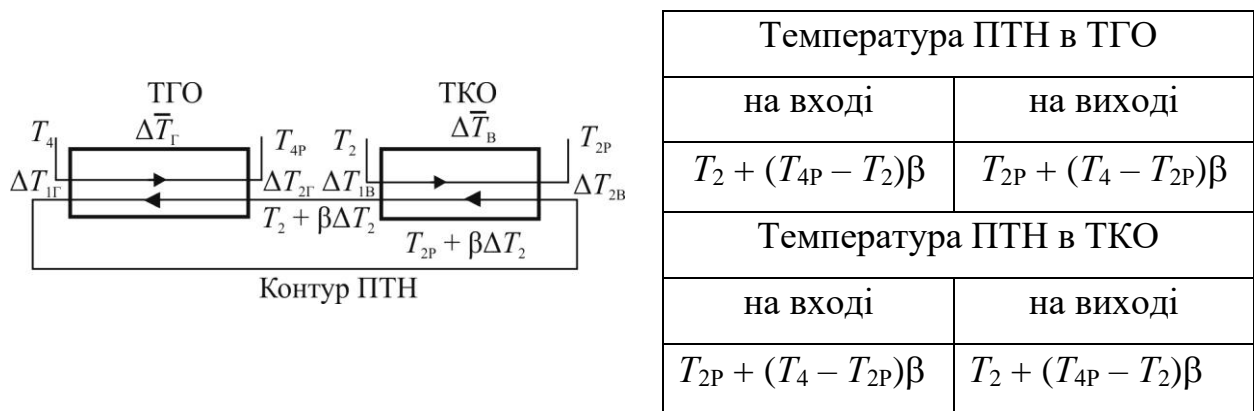


Рисунок 5.14 – Розрахункова схема регенератору з ПТН

Для оцінки впливу параметрів ПТН на масогабаритні показники регенератора проаналізовано зміни відносного температурного напору β . Параметр β може бути визначений із співвідношення

$$\Delta \bar{T}_В = \frac{\beta \cdot \Delta \bar{T}_Г}{(1 - \beta)}, \quad (5.6)$$

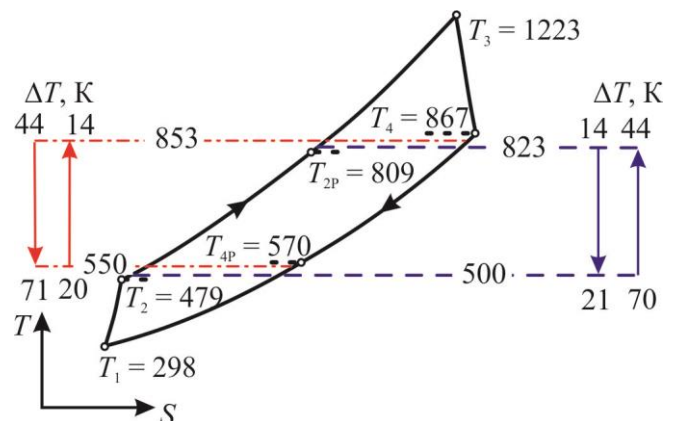
де $\Delta \bar{T}_Г = \frac{\Delta T_{1Г} - \Delta T_{2Г}}{\ln \frac{\Delta T_{1Г}}{\Delta T_{2Г}}}$ та $\Delta \bar{T}_В = \frac{\Delta T_{1В} - \Delta T_{2В}}{\ln \frac{\Delta T_{1В}}{\Delta T_{2В}}}$ – середньологарифмічні температурні

напори по газовій та повітряній сторонах відповідно (рис. 5.15).

З рівняння теплового балансу в теплообміннику

$$Q_Г = Q_В k_Г \cdot F_Г \cdot \Delta \bar{T}_Г = k_В \cdot F_В \cdot \Delta \bar{T}_В. \quad (5.7)$$

Рисунок 5.15 – Графічне представлення відносного температурного напору ПТН в $T-S$



координатах¹

Припустивши, що k_B та k_Γ – лінійні функції виду $k_\Gamma = k_1 - a_1 \cdot \beta$; $k_B = k_2 + a_2 \cdot \beta$ досліджуємо функцію

$$f(k_1, a_1, k_2, a_2, \beta) = \left(\frac{1}{\beta(k_2 + a_2\beta)} + \frac{1}{(1-\beta) \cdot (k_1 - a_1\beta)} \right). \quad (5.8)$$

В випадку постійності коефіцієнтів теплопередачі введемо комплекси

$$A = \frac{Q_\Gamma}{(\Delta T_4 - \Delta T_2) \cdot k_B} \cdot \ln \left(\frac{\Delta T_4}{\Delta T_2} \right), \quad \bar{k} = \frac{k_B}{(\Delta T_4 - \Delta T_2) \cdot k_\Gamma} \quad (5.9)$$

і будемо досліджувати вплив відносного температурного напору β на величину сумарної площі теплообмінників

$$F = F_\Gamma + F_B = A \cdot \left(\frac{\bar{k}}{(1-\beta)} + \frac{1}{\beta} \right). \quad (5.10)$$

Дослідження функції на екстремум $\frac{\partial F}{\partial \beta} = 0$ в діапазоні $0 < \beta < 1$ дозволяє

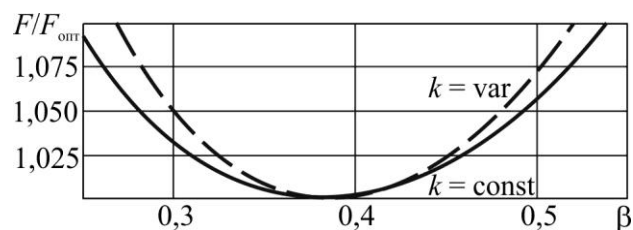
визначити мінімум функції
$$\left(\begin{array}{c} -\frac{\sqrt{k}-1}{k-1} \\ 1 \\ \frac{1}{\sqrt{k}+1} \end{array} \right).$$

Це відповідає відомим умовам мінімуму сумарної площі теплообмінника в [173].

Згідно отриманим залежностям необхідність досягнення постійної ефективності ГТД (що відповідає постійному гідравлічному опору теплообмінників) призводить до збільшення сумарної площі теплообмінників при значеннях відносного температурного напору β , які відрізняються від оптимального (рис. 5.16).

¹ Для параметрів ГТД, які зазначені в табл. 5.6

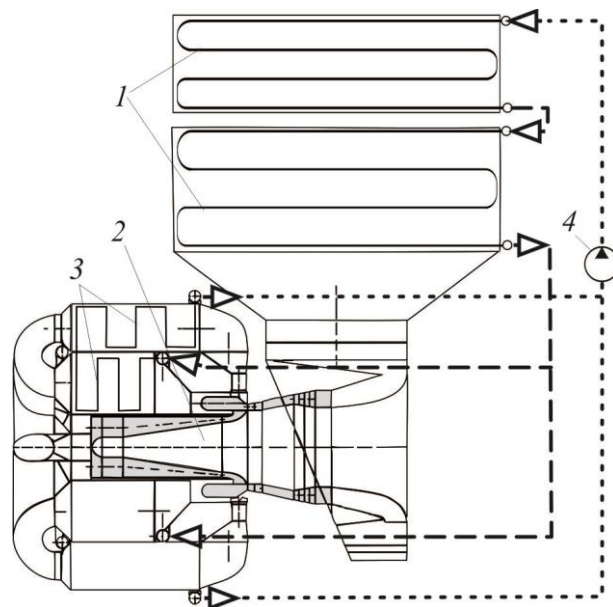
Рисунок 5.16 – Залежність відносної площі теплообмінного апарату від відносного температурного напору ПТН



З метою перевірки наведених допущень виконано математичне моделювання процесів в регенеративному ГТД (рис. 5.17) з двосекційним ТГВ, розміщеним на вихлопі ГТД, та двосекційним ТКО з переносом теплоти рідиннометалевим теплоносієм. Прокачування проміжного теплоносія здійснюється послідовно через кожен теплообмінник циркуляційним насосом. В якості базового двигуна приймався ГТД четвертого покоління розробки «Зоря»–«Машпроект» потужністю 16 МВт [36].

Рисунок 5.17 – Конструктивна схема регенеративного ГТД потужністю 16 МВт з проміжним теплоносієм:

- 1 – секції теплообмінника газовідводу;
- 2 – ГТД;
- 3 – секції теплообмінника компресора;
- 4 – циркуляційний насос ПТН



Діапазон значень ступеня регенерації R прийнятий 0,8–0,85, так як подальше його збільшення супроводжується значним зростанням теплообмінної поверхні.

Температура газів перед турбіною обмежувалася 1173–1373 К відповідно до рекомендацій [164], виходячи з вимог щодо забезпечення надійності мобільних енергокомплексів.

При виборі міри підвищення тиску в циклі оцінювалася ефективність регенератора. В якості критерію приймалася відносна теплова потужність

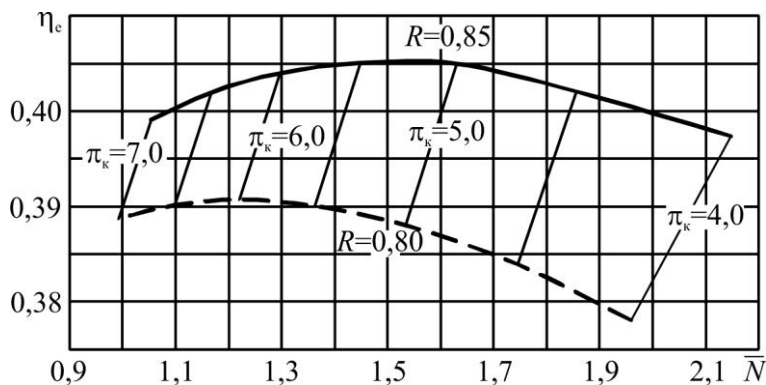
регенератора

$$\bar{N} = N_T / N_e, \quad (5.11)$$

де N_T – теплова потужність регенератора.

Результати розрахунків дозволили виявити суттєвий взаємозв'язок параметрів регенеративного ГТД (рис. 5.18) та визначити раціональний діапазон варіювання мірою підвищення тиску (табл. 5.6).

Рисунок 5.18 – Взаємозв'язок ККД ГТД та відносної теплової потужності регенератора



Таблиця 5.6 – Характеристики регенеративного ГТД з ПТН

Параметри циклу	Значення
Ступінь регенерації, R	0,85
Кількість компресорів, n_k	1
Кількість турбін, n_t	2
Температура газів перед ТВД, T_3	1223 К
Міра підвищення тиску в циклі, π_k	4,8–5,0
Витрата повітря через компресор ГТД, G_k	~ 80 кг/с
Потужність ГТД, N_e	~ 16000 кВт
Ефективний ККД	~ 0,4

Забезпечення заданих постійних значень коефіцієнтів відновлення повного тиску в теплообмінниках газовідводу та компресора ($v_T = 0,975$; $v_B = 0,970$) вимагає зміни величини швидкості в розрахункових перерізах ТГВ і ТКО. Це приводить до змінювання коефіцієнтів теплопередачі при трансформації відносного температурного напору. Вплив відносного температурного напору на

коефіцієнти теплопередачі у верхній і нижній секції теплообмінників газовідводу та компресора показано на рис. 5.19.

В повітряній і газовій секції теплообміннику спостерігається стійкий турбулентний стан потоку ($Re \geq 10^4$).

Вплив відносного температурного напору в діапазоні 0,25 – 0,8 на площу поверхонь теплообміну ТГВ і ТКО показано на рис. 5.20.

Отримані результати збігаються з рекомендаціями [172, 173]. Слід врахувати, що відповідно до даних [173] сумарна площа теплообмінника може бути зменшена ще на ~30 %, але це призведе до зміни коефіцієнтів відновлення повного тиску v в теплообмінниках газовідводу та компресора. В результаті ефективний ККД газотурбінної установки η в діапазоні значень $\beta = 0,2\text{--}0,5$ зменшиться на 1–1,5 % (рис. 5.21).

Рисунок 5.19 – Залежність коефіцієнтів теплопередачі секцій ТГВ і ТКО від β : 1, 2 – верхня та нижня секція відповідно

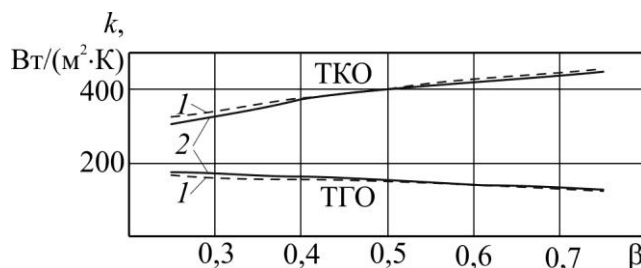


Рисунок 5.20 – Залежність відносних площин теплообмінників ТГВ і ТКО від відносного температурного напору ПТН

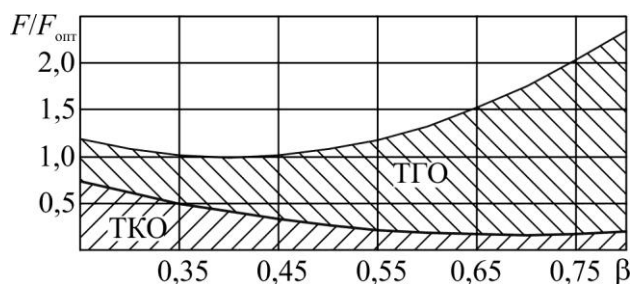
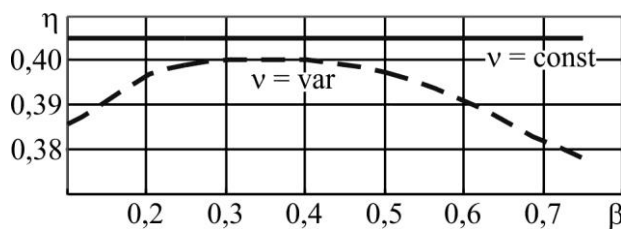


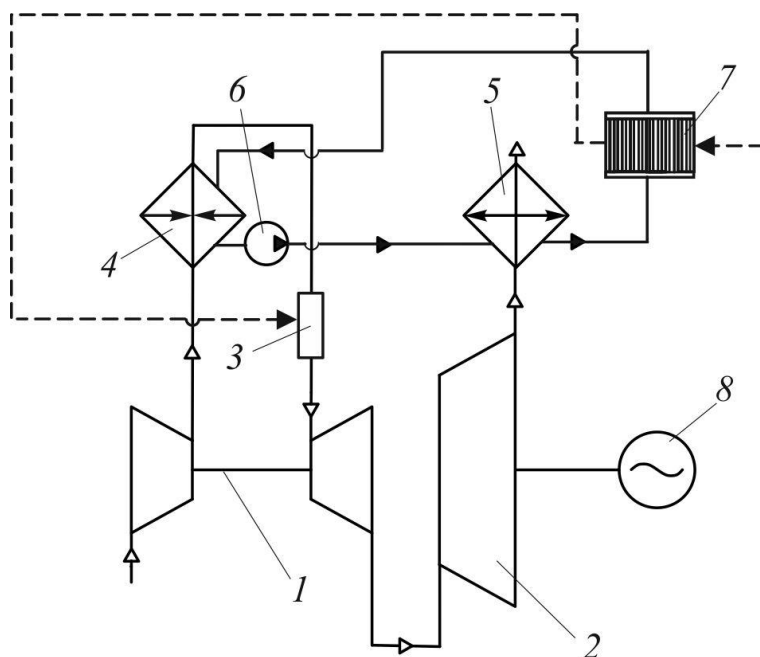
Рисунок 5.21 – Вплив коефіцієнтів відновлення повного тиску в ТГВ та ТКО на ефективність регенеративного ГТД



За результатами математичного моделювання для регенеративного ГТД ($R = 0,85$, $\pi_k = 5$) з проміжним теплоносієм відношення потужність/об'єм склало

Для енергомодуля на базі регенеративного ГТД з підсистемою термохімічної обробки палива схема з проміжним теплоносієм дає можливість розмістити термохімічний реактор за межами газовипускного тракту ГТД та зменшити втрати повного тиску в елементах (рис. 5.22) [176].

1 – силова турбіна; 2 – турбокомпресорний блок; 3 – камера згоряння; 4 – ТКО; 5 – циркуляційний насос ПТН; 6 – ТГВ; 7 – термохімічний реактор; 8 – генератор



Запропоновану концепцію реалізує енергокомплекс (рис. 5.23) на базі регенеративного газотурбінного двигуна з підсистемою термохімічної обробки палива та двигуна внутрішнього згоряння, що працює на продуктах конверсії базового палива.

225

конверсії базового палива виробляється в охолоджувачі наддувного повітря (ОНП) турбонаддувного агрегату (ТНА). Застосування в запропонованій схемі контуру ПТН дає можливість розмістити ТХР поза газовипускним трактом ГТД, зменшивши при цьому втрати повного тиску та забезпечивши задані значення коефіцієнтів відновлення повного тиску ТГВ та ТКО.

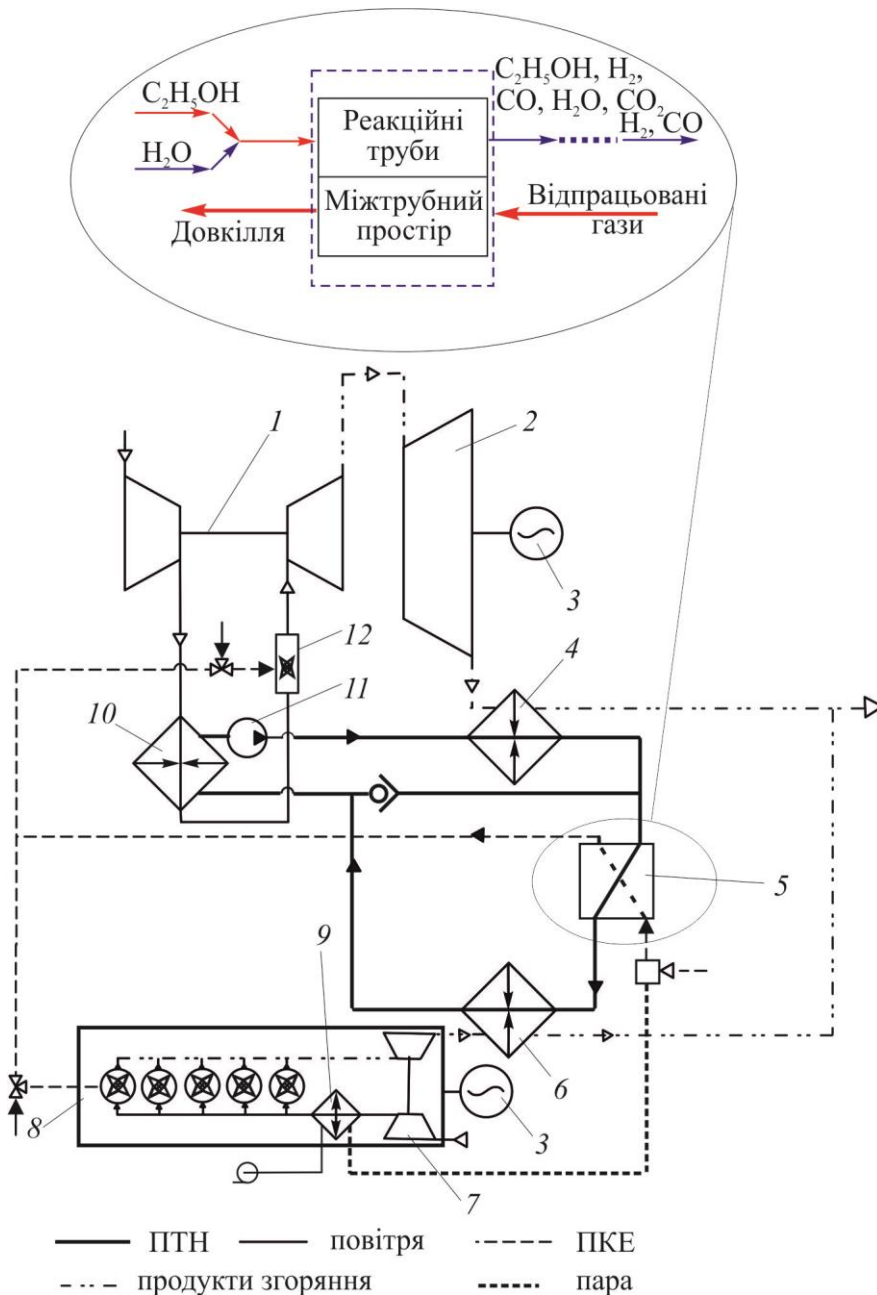


Рисунок 5.23 – Схема комбінованого енергомодуля на базі регенеративного ГТД з підсистемою термохімічної обробки палива та ДВЗ с контуром ПТН: 1 – турбокомпресорний блок; 2 – силова турбіна; 3 – генератор; 4 – ТГВ ГТД; 5 – ТХР; 6 – ТГВ ДВЗ; 7 – ТНА; 8 – ДВЗ; 9 – ОНВ; 10 – ТКО; 11 – циркуляційний насос ПТН; 12 – камера згоряння

5.1.2 Комбіновані дизель-газотурбінні енергетичні комплекси з підсистемами термохімічної обробки палива

Аналіз потенціалу вторинних енергоресурсів ГТД показує, що теплова потужність відпрацьованих газів перевищує потреби в тепловій потужності теплообмінних апаратів підсистеми термохімічної обробки палива. Таким чином, підсистема ТХУ газотурбінного енергомодуля конфігурації DF/GTE/EI може забезпечити й термохімічну обробку палива дизельного двигуна іншого енергомодуля DF/D4S/EI.

Розглянуто комбінований дизель-газотурбінний енергокомплекс конфігурації (DF/GTE/EI) + (DF/D4S/EI) з термохімічною обробкою палива і регенерацією теплоти відпрацьованих газів ГТД. На рис. 5.24 приведено схему з використанням в якості базового палива етанолу [128].

Вода і етанол в необхідних пропорціях подаються насосами 12, 15 з резервуарів 13, 14 в випарники 11, 16. В випарниках під дією теплоти відпрацьованих газів ГТД 1 відбувається послідовно нагрів, випаровування та перегрів до температури початку реакції парової конверсії. Потоки пари, що утворюються при випаровуванні етанолу та води, змішуються в змішувачі 10 та надходять до реактора 9. Під дією теплоти відпрацьованих газів ГТД, які протікають в міжтрубному просторі реактора TCR, відбувається реакція конверсії з утворенням синтез-газу. Синтез-газ надходить в теплообмінник 8, в якому охолоджується до необхідної температури. Після охолоджувача синтез-газ надходить в нейтралізатор CO₂ 7, звідки впорскується через електромагнітний клапан 6 на вхід в компресор ТНА 2 та далі разом з повітрям подається безпосередньо в циліндри ДВЗ 4. Конденсат з теплообміннику 8 подається до резервуару 13. Втрати води в циклі компенсуються утилізаційними опріснювальними установками [181], які використовують теплоту охолодної води ДВЗ (на рис. 5.24 не показано).

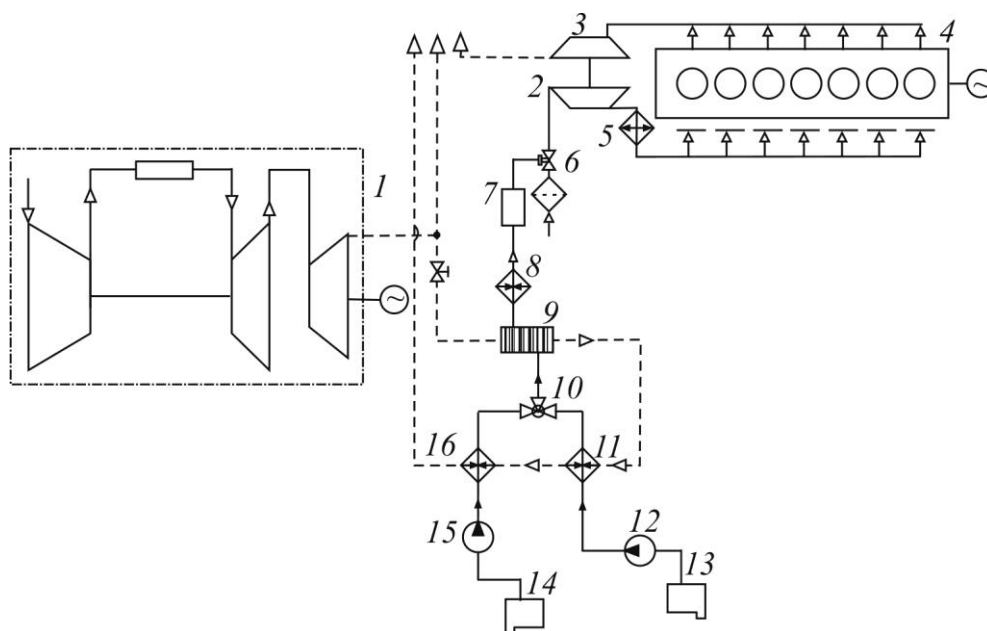


Рисунок 5.24 – Схема комбінованого дизель-газотурбінного енергокомплексу конфігурації (DF/GTE/El)+(DF/D4S/El):

1 – ГТД; 2 – компресор турбонагнітачу ДВЗ; 3 – турбіна турбонагнітачу ДВЗ; 4 – ДВЗ; 5 – охолоджувач надувного повітря ДВЗ; 6 – електромагнітний клапан; 7 – нейтралізатор; 8 – охолоджувач синтез-газу; 9 – термохімічний реактор; 10 – змішувач; 11 – випарник води; 12 – насос подачі води; 13 – резервуар води; 14 – резервуар етанолу; 15 – насос подачі етанолу; 16 – випарник етанолу

На першому етапі проведено аналіз взаємозв'язків термодинамічних параметрів газотурбінного двигуна, показників системи термохімічної обробки палива та характеристик ДВЗ, який працює на продуктах конверсії вуглеводневого палива.

При проведенні розрахунків прийнято:

- теплота відхідних газів, яка необхідна для здійснення конверсії палива, визначається рівнянням (3.33);
- максимальна допустима температура ендотермічних реакцій конверсії етанолу визначається рівнянням (3.34).

Відносно низький тиск підведення газоподібного палива до СОД (0,5–0,6 МПа) дозволив використовувати залежності (3.17)–(3.21) для визначення діапазону ефективних параметрів підсистеми термохімічної обробки палива.

Розглядалися установки на базі газотурбінного двигуна UGT 2500 (див.

табл. 5.5) та середньообертових двигунів Wartsila 18V32, 5L64, 18V46. Базові палива при моделюванні – етанол, бутан, пропан, етан. За критерій ефективності комбінованої установки обрано питому витрату базового палива C_N , кг/(кВт·год).

З отриманих залежностей (рис. 5.25) видно, що при температурі відпрацьованих газів, яка відповідає номінальному режиму роботи UGT 2500, можлива ефективна конверсія етанолу та бутану (зниження питомої витрати палива 20 та 18 % відповідно). Менш ефективна термохімічна регенерація теплоти відхідних газів ГТД при конверсії пропану і бутану: 16 і 12 % відповідно [59, 128].

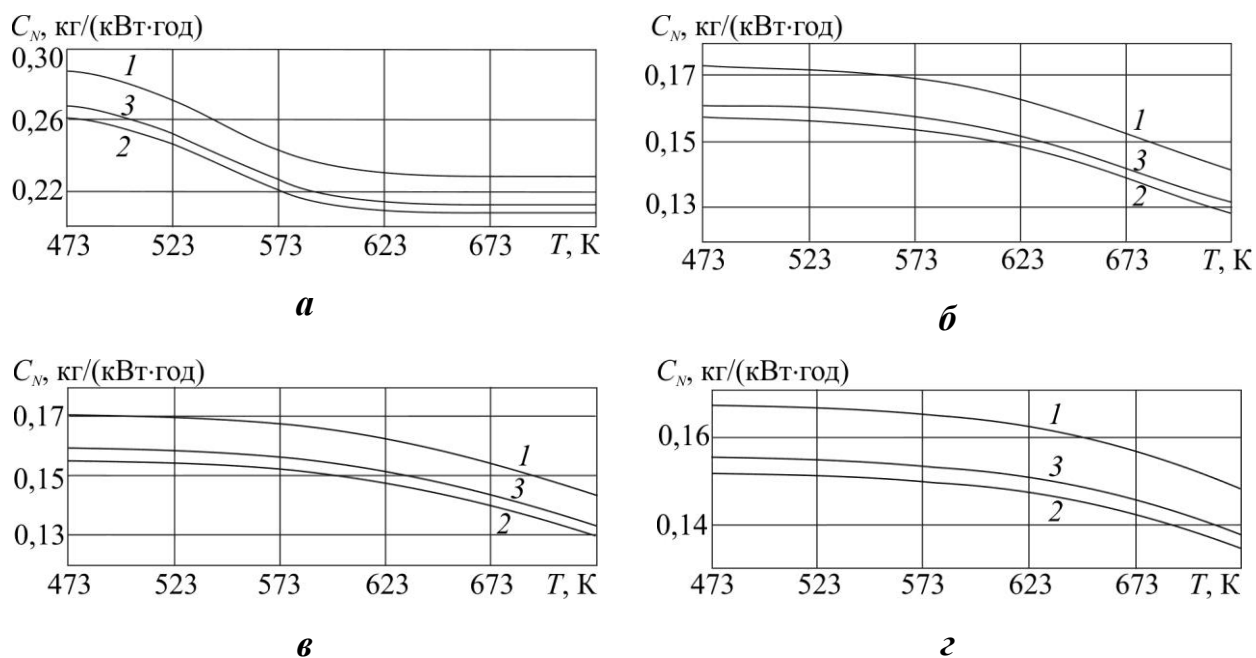


Рисунок 5.25 – Питома витрата палива ДВЗ в залежності від температури відпрацьованих газів ГТД для базового палива:
a – етанол; *б* – бутан; *в* – пропан; *г* – етан; 1 – Wartsila 18V32; 2 – Wartsila 5L64; 3 – Wartsila 18V46

Розрахунки показують, що теплового потенціалу відпрацьованих газів UGT 2500 достатньо для отримання об'єму синтез-газу, який необхідний для роботи найбільш потужного ДВЗ – Wartsila 18V46. Зменшення питомої витрати палива для ДВЗ Wartsila 18V46 становить 20 % (для біоетанолу). Відношення потужностей дизельного та газотурбінного енергомодулів при цьому дорівнює $N_e^{DF/D4S} / N_e^{DF/GTE} \approx 6$ (для біоетанолу).

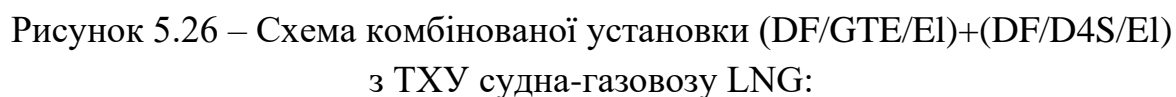
Другий етап досліджень передбачав детальне моделювання процесів в комбінованому дизель-газотурбінному енергокомплексі конфігурації (DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) з підсистемою термохімічної утилізації та перетворення енергії для газозову LNG. Аналіз складу енергетичних комплексів таких суден проведено в розділі 1.

За базовий варіант обрана енергетична установка потужністю 40–50 МВт газозову LNG класу Q-max. При моделюванні процесів випаровування вантажу застосовувалися методики та алгоритми, сформульовані в [182].

Розглянуто характеристики комбінованої установки (DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) з ТХУ сумарною потужністю 45 МВт в складі ГТД Siemens SGT 400 (табл. 5.1) та трьох СОД Wartsila 5L64 потужністю $\sum N_e^{D4S} = 3 \times 10,7$ МВт (рис. 5.26).

У зв'язку з різноманіттям та складністю процесів в такому енергокомплексі при моделюванні реалізовано модульний підхід (SM), коли рівняння для кожної групи блоків розв'язувалися за допомогою індивідуальних алгоритмів (див. підрозділ 3.1). Процеси в ГТД, ДВЗ та підсистемі термохімічної обробки визначалися окремо з подальшим зрошуванням отриманих результатів та поєднанням моделей груп блоків зв'язками у вигляді матеріальних та енергетичних потоків для моделювання загальної схеми енергокомплексу [59, 155, 175].

Математичну модель газотурбінного двигуна створено за допомогою системи моделювання фізико-хімічних процесів Aspen Plus [167]. Розрахункова схема ГТД представлена на рис. 5.27. Модель враховує основні фізичні співвідношення: матеріальний та тепловий баланси; фазову рівновагу; процеси тепло- і масопередачі. В моделі враховано втрати повного тиску всіх елементів газоповітряного тракту, відбір повітря на охолодження лопаток турбіни та втрати повного тиску в елементах підсистеми термохімічної обробки палива.



The diagram illustrates the flow of a gas turbine engine. Air enters from the left, passes through a compressor, and is then split into two paths: one goes to the combustor via the 'AIRCOMB' box, and the other goes to the combustor via the 'MIXT' box. Fuel is also fed into the combustor. The combustor produces hot gases, which pass through a turbine (labeled 'HOTGAS'). The hot gases then pass through a compressor turbine (labeled 'HOTGAS2') and a power turbine (labeled 'HOTGAS3'). The power turbine produces power, which is then used to drive the compressor and the power turbine itself. The exhaust gases exit the engine through an exhaust duct.

Рисунок 5.27 – Розрахункова схема газотурбінного двигуна (Aspen Plus)

231

теплообмінному апараті T1 до пароутворення, далі пара перегрівается в теплообміннику T2. Налаштування теплообмінних апаратів T1 та T2 виконувалося відповідно до підходів, які сформовані в розділі 3 (див. залежності (3.13)–(3.17)). Термохімічний реактор розглядається як рівноважний реактор, параметри якого визначаються умовами мінімізації вільної енергії Гіббса.

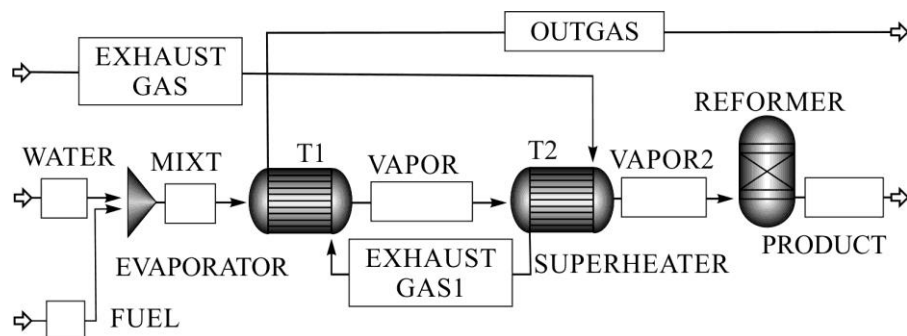


Рисунок 5.28 – Розрахункова схема термохімічного реактору (Aspen Plus)

Представлена на рис. 5.29 схема розрахункової моделі двигуна внутрішнього згоряння містить наступні структурно-функціональні складові: матеріальні потоки – паливо, повітря, гази; блоки – змішувачі потоків, пристрої зміни тиску, теплообмінні апарати, реактор. Турбіна використовується для моделювання процесів розширення в циліндрах; компресор – для моделювання процесів стиснення робочого тіла, процеси згоряння моделюються в спеціальному реакторі.

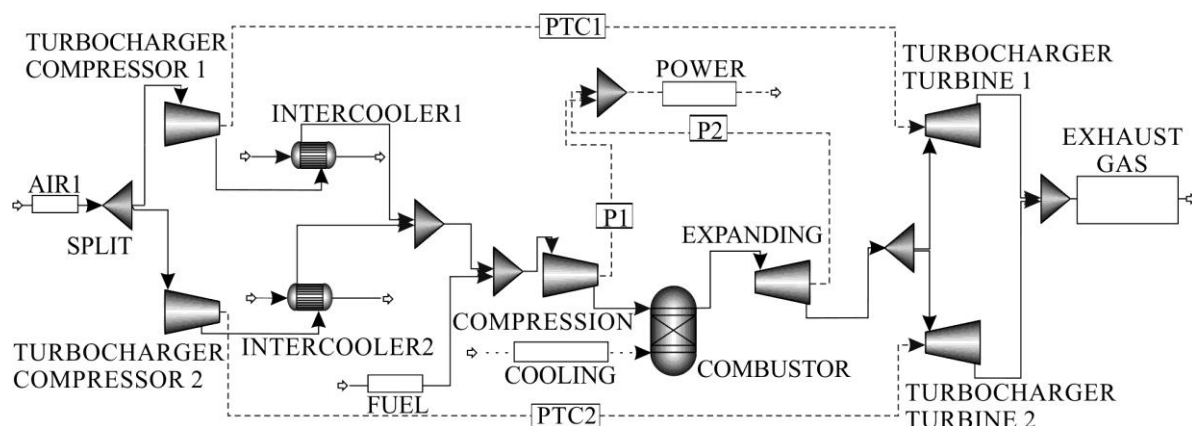


Рисунок 5.29 – Розрахункова схема ДВЗ (Aspen Plus)

Верифікація моделі ДВЗ виконувалась за проектною документацією до двигуна, яка надана на офіційному сайті Wartsila.

Проаналізовано енергоефективність енергетичної установки

(DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) з ТХУ. В якості критерію ефективності використання енергії палива обрано ККД установки:

$$\eta = \frac{\sum N_e^{comb} - \sum N_{add}}{m_{\sum f} \cdot H_U^B}, \quad (5.12)$$

де $\sum N_e^{comb}$ – сумарна потужність комбінованої установки; $m_{\sum f}$ – сумарна секундна витрата палива двигунами установки; H_U^B – теплота згоряння базового палива; $\sum N_{add}$ – сумарні витрати потужності на привід насосів та іншого обладнання підсистеми ТХУ;

$$\sum N_e^{comb} = i \cdot N_e^{GTE} + j \cdot N_e^{D4S}; \quad (5.13)$$

$$m_{\sum f} = m_{\sum fGTE} + m_{\sum fD4S}, \quad (5.14)$$

де i, j – кількість ГТД та ДВЗ, відповідно; N_e^{GTE} , N_e^{D4S} – потужність на вихідному валу кожного ГТД та ДВЗ, відповідно; $m_{\sum fGTE}$ та $m_{\sum fD4S}$ – секундна витрата палива ГТД та ДВЗ, відповідно.

Розглянуто три різних склади LNG¹ – Light, Medium та Heavy. Проаналізовано енергоефективність базової конфігурації (DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) без ТХУ та ефективність наступних схем з ТХУ :

– варіант 1: ГТД працює на базовому паливі, ДВЗ працює на конвертованому синтез-газі;

– варіант 2: ГТД та ДВЗ працюють на конвертованому синтез-газі.

Результати визначення енергоефективності представлено в табл. 5.7. Більш ефективна робота установки на LNG типу Heavy пояснюється високим вмістом етану в газі. В діапазоні температур конверсії (500–530 °С) приріст теплотворної здатності продуктів конверсії етану в три рази перевищує цей показник для метану².

Встановлено, що при термохімічній обробці палива на основі LNG, LPG відношення $N_e^{DF/D4S} / N_e^{DF/GTE} < 4$.

Згідно з результатами моделювання випаровування вантажу, які

¹ Склад LNG приймався відповідно до табл. 3.8.

² Див. рис. 3.5 та рівняння (3.20), (3.21).

підтверджуються даними [184], для вищевказаного газозова LNG типу Q-max в переході з повним завантаженням за добу випаровується до 180 т вантажу. Проведені розрахунки показують, що цього достатньо для забезпечення роботи комбінованої дизель-газотурбінної установки з ТХУ сумарною потужністю 45 МВт.

Таблиця 5.7 – Результати визначення енергоефективності

Тип установки	Тип LNG		
	Light	Medium	Heavy
	ККД, %		
(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI)	44,0		
(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) з ТХУ (варіант 1)	46,3	46,4	46,7
(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) з ТХУ (варіант 2)	48,0	48,2	48,5

Дослідження процесів в енергетичній установці (DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) з ТХУ показує, що при роботі двигунів на продуктах конверсії випару LNG, ККД установки збільшується на 3,5–4,5 % і становить 48–49 %. Можливі також й альтернативні варіанти складу подібної енергетичної установки (рис. 5.30) [185].

Комбіновані дизель-газотурбінні енергокомплекси з термохімічною обробкою палива перспективні також на морських об'єктах офшорних нафтових родовищ, де можливо застосування попутного газу в якості палива [61,62].

Попутний газ характеризується широким компонентним складом та вмістом важких вуглеводнів (див. табл. 2.6). Це викликає обмеження на використання такого палива в ДВЗ (метанове число $MN > 46,8$; вміст метану > 70 %; вміст водню < 30 %) [34].

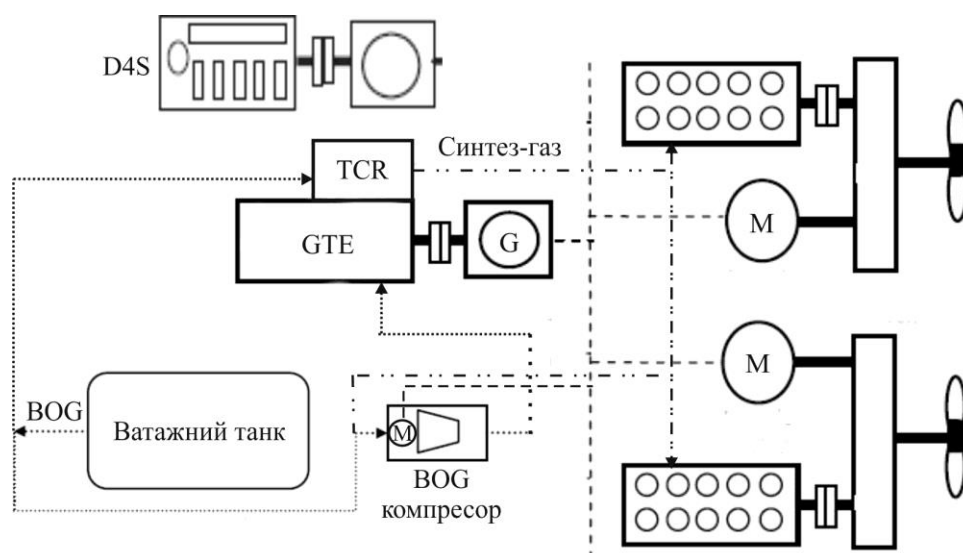


Рисунок 5.30 – Альтернативна схема комбінованої енергетичної установки (DF/GTE/EI)+(DF/D4S/M) з ТХУ для газозову LNG

Проведено розрахунки метанового числа для попутних газів різного складу. Розрахунки проводилися за допомогою он-лайн калькулятора Wartsila, а також з використанням методів Інституту газових досліджень (GRI) [186]. Результати розрахунків¹ MN та теплотворної здатності H_U представлено в табл. 5.8.

На рис. 5.31 представлено дві конструктивні схеми енергомодуля, перспективного до використання на плавучих об'єктах інфраструктури офшорних родовищ. Він складається з газотурбінного двигуна простого циклу та 2-х двопаливних СОД. Всі двигуни працюють на продуктах парової конверсії попутного газу. Теплота відпрацьованих газів ГТД утилізується в термохімічному реакторі та парогенераторі підсистеми термохімічної обробки палива. Блок ОУ на схемах не показаний.

В схемі з єдиним реактором (рис. 5.31,*a*) конверсія попутного газу проводиться при тиску, який відповідає тиску підведення паливного газу в ДВЗ (0,6 МПа). Такий помірний тиск процесу передбачає зміщення діапазону ефективної конверсії в область відносно низьких температур, які відповідають температурі відпрацьованих газів ГТД. Отриманий в реакторі синтез-газ направляється в дегідратор. Осушений синтез-газ має значно менший вміст

¹ Компонентний склад попутного газу та джерела інформації надано в табл. 3.11.

негорючих компонентів, що істотно спрощує процеси сумішоутворення і згоряння. Надалі осушений синтез-газ розподіляється на два потоки. Перший потік прямує до ДВЗ, а другий – дотискається компресором до тиску підведення паливного газу в ГТД (1,5 МПа). Вода, отримана в процесі дегідратації, повертається в цикл. Відмітимо, що недоліком схеми є те, що стосовно ГТД при дегідратації синтез-газу має місце втрата теплового потенціалу парогазової суміші.

Таблиця 5.8 – Результати визначення метанового числа та теплотворної здатності для попутного газу різного складу

Параметр	Попутний газ				
	T1	T2	T3	T4	T5
Wartsila он-лайн калькулятор WMN	<46,8	<46,8	<46,8	<46,8	<46,8
Методи GRI [7]:					
GRI LCR MN	27,5	47,3	42,6	21,5	26,1
GRI H/C MN	64,4	53,4	61,2	53,3	67,9
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	46,3	38,6	44,0	42,9	47,9

У другому варіанті (схема на рис. 5.31,б) передбачено два реактора – високого (1,5 МПа) та низького тиску (0,6 МПа). Парогазова суміш після реактора високого тиску має достатньо високу температуру і подається в камеру згоряння, як в циклі STIG. Синтез-газ після реактора низького тиску проходить процес дегідратації і далі подається до ДВЗ.

Доцільний діапазон застосування розглянутих схем комплексно оцінено за ефективністю використання хімічної енергії попутного газу та ефективністю термохімічної конверсії вуглеводнів, що входять до його складу.

В якості критерію оцінки ефективності використання енергії палива обрано ККД установки, який розраховується згідно залежності (5.12).

В якості критеріїв оцінки ефективності термохімічної конверсії вуглеводнів, які містяться в попутному газі, прийнято два параметри:

- ступінь конверсії (3.24) відповідного вуглеводню (етан, пропан, бутан, пентан);

- метанове число дегідрованого синтез-газу, яке визначено параметрами WMN та GRI LCR MN.

Для знаходження параметра WMN використано он-лайн калькулятор метанового числа Wartsila.

Для обчислення параметра GRI LCR MN використана залежність [182]:

$$\begin{aligned} \text{GRI LCR MN} = & 1,445 \cdot (137,78 \cdot x_1 + 29,948 \cdot x_2 - 18,193 \cdot x_3 - \\ & - 167,062 \cdot x_4 + 181,233 \cdot x_5 + 26,994 \cdot x_6) - 103,42, \end{aligned} \quad (5.16)$$

де x – мольна частка відповідного компоненту: $\text{CH}_4 = x_1$; $\text{C}_2\text{H}_4 = x_2$; $\text{C}_3\text{H}_8 = x_3$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = x_4$; $\text{CO}_2 = x_5$; $\text{N}_2 = x_6$.

В основу математичної моделі газотурбінного двигуна покладено залежності для його укрупненого розрахунку з урахуванням втрат повного тиску. Модель камери згоряння заснована на комбінованій хімічній та фазовій рівновазі. Визначення компонентного складу продуктів парової конверсії здійснюється за рахунок мінімізації вільної енергії Гіббса. Витрати теплоти відхідних газів, необхідні для здійснення конверсії палива, визначено через рівняння теплового балансу термохімічного реактора (3.33).

Моделювання процесів в ГТД проводилося для параметрів базового ГТД при наступних обмеженнях:

- фіксована потужність ГТД (2,7 МВт);
- фіксована температура газу перед турбіною ($T_3 = 1223 \text{ K}$);
- параметри навколишнього середовища згідно ISO 3046-1: 2002.

Стосовно до ДВЗ Wartsila 6L50DF при фіксованих потужності 5,7 МВт та питомій витраті палива 7,41 МДж/(кВт·год) на режимі 100 % навантаження визначалася зміна секундної витрати палива в перерахунку на теплотворну здатність попутного газу (див. табл. 5.8), що подається в установку.

Виявлено, що схема рис. 5.31, а має низькі показники ефективності. Витрати

енергії на стиснення осушеного синтез-газу до тиску подачі в ГТД перевищують підвищення ККД за рахунок парової конверсії попутного газу. В результаті ефективність схеми рис. 5.31, а навіть нижче, ніж у базовому варіанті без ТХУ. Аналіз складу продуктів термохімічної конверсії показав повне перетворення вуглеводнів (рис. 5.32).

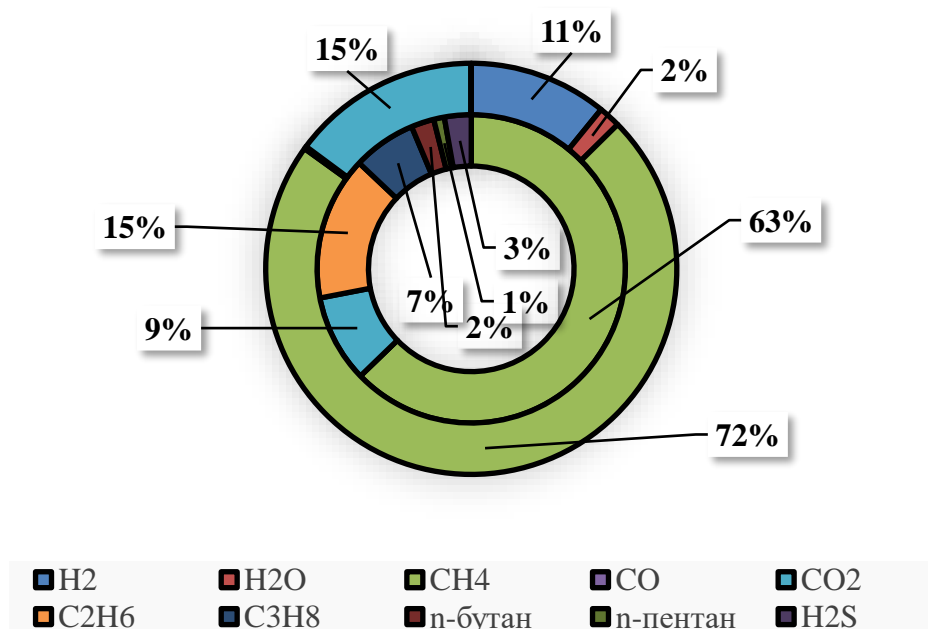


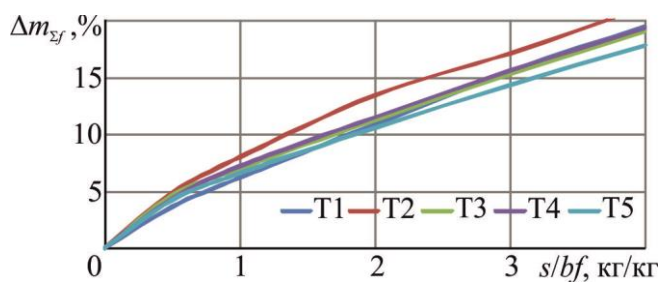
Рисунок 5.32 – Хімічний склад (мольні частки) базового попутного газу (внутрішнє кільце) та синтез-газу (зовнішнє кільце)

Результати моделювання процесів в установці за схемою рис. 5.31,б доказали її ефективність. За рахунок парової конверсії попутного газу та використання потенціалу парогазової суміші масова витрата попутного газу, що використовується в якості палива ГТД, знизилась на 19–20 % (рис. 5.33). Це обумовлює зростання ККД газотурбінного блоку до 6,8 %.

За рахунок термохімічної обробки палива загальний ККД установки підвищився на 3 % в порівнянні з базовим варіантом та склав 45,6 %. Ця величина порівняна з заявленими в Wartsila GasReformer показниками (див. підрозділ 1.3).

Визначено склад синтез-газів, отриманих в результаті конверсії різних попутних газів (табл. 5.9).

Рисунок 5.33 – Зменшення масової витрати паливного газу різного складу залежно від співвідношення пара / газ (масові долі)



Таблиця 5.9 – Параметри синтез-газів, які застосовуються в ДВЗ

Параметр	Попутний газ				
	T1	T2	T3	T4	T5
Хімічний склад синтез-газу, який застосовується в якості палива для ДВЗ, (% , мол)					
Водень (H ₂)	12,7	10,7	11,7	11,4	12,9
Водяна пара (H ₂ O)	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Метан (CH ₄)	74,0	71,3	73,4	73,7	74,6
Оксид вуглецю (CO)	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1
Діоксид вуглецю (CO ₂)	10,6	14,6	10,3	10,4	10,7
Азот (N ₂)	0,8	1,5	2,8	2,6	—
Wartsila он-лайн калькулятор WMN	78	82	77	78	87
GRI LCR , рівняння (5.18)	78	84	76,7	77,6	79,3
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	35,7	28,1	30,5	34,7	36,2

Аналіз ефективності термохімічної обробки попутного газу різного складу показав, що отримані параметри відповідають вимогам Wartsila щодо кількості метану та хімічного складу паливного газу.

За результатами моделювання визначено основні параметри модуля підсистеми термохімічної обробки попутного газу з окремими термохімічними реакторами високого та низького тиску (табл. 5.10).

Таблиця 5.10 – Проектна специфікація блоку термохімічної обробки попутного газу з окремими термохімічними реакторами високого та низького тиску для енергетичного модуля потужністю 14,1 МВт

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
Тиск: реактор високого тиску реактор низького тиску	МПа	1,4 0,6
Температура синтез-газу: реактор високого тиску – вхід/вихід реактор низького тиску – вхід/вихід	К	714/680 675/660
Питома масова витрата на 1 МВт корисної потужності: живильного газу сумарна потреба пари: з рециркуляційною котловою водою з живильною водою	кг/(МВт·год)	165–170 300–350 120–140 180–210
Встановлена потужність електричного обладнання	кВт	25–30

Таким чином, для виявлення умов ефективного застосування термохімічних технологій в судновій енергетиці запропоновано: новітні установки на базі ГТД простого і регенеративного циклів, в тому числі з проміжним теплоносієм, а також перспективні комбіновані дизель-газотурбінні установки.

Запропоновані енергокомплекси з термохімічною утилізацією можна рекомендувати до застосування на суднах-газовозах, поромах, круїзних лайнерах, судах Ro-Rax, морських бурових платформах і інших морських об'єктів нафтогазовидобування.

Дослідження процесів в камерах згоряння суднових газотурбінних модулів при роботі на продуктах термохімічної обробки палива детально розглянуто в розділ 6.

5.2 Теоретичні дослідження параметрів суднових енергетичних модулів з використанням термохімічної технології перетворення енергії в металогідридних утилізаційних установках

Для оцінки перспективності використання металогідридних утилізаційних установок в складі суднових енергетичних модулів проведено математичне моделювання процесів термохімічної утилізації теплоти відпрацьованих газів МОД [187–189]. Розглянута утилізаційна металогідридна установка показана на рис. 5.34.

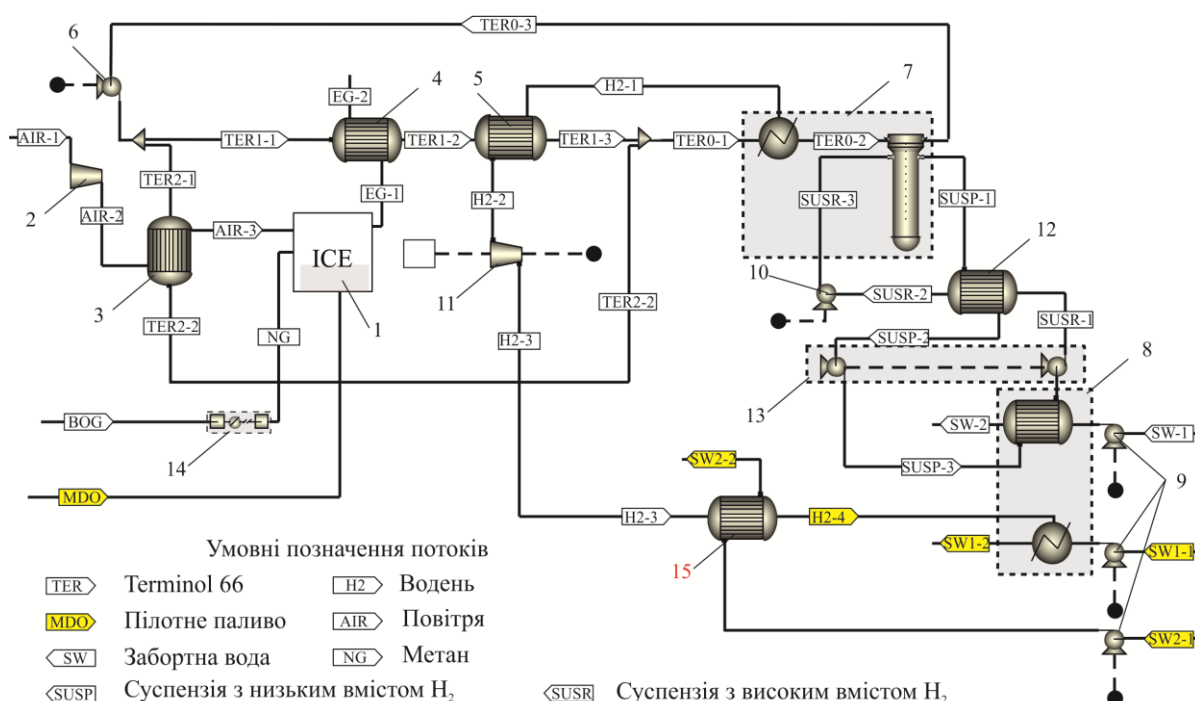


Рисунок 5.34 – Розрахункова схема утилізаційної металогідридної установки:
 1 – ДВЗ; 2 – турбокомпресор; 3, 4 – утилізаційні теплообмінники охолоджувача наддувного повітря та відпрацьованих газів; 5 – перегрівач водню; 6 – циркуляційний насос контуру нагріву; 7 – десорбер, 8 – сорбер; 9 – насоси контуру охолодження; 10 – живильний насос; 11 – воднева розширювальна машина; 12 – регенераційний теплообмінник; 13 – турбонасосний агрегат; 14 – компресор паливного газу; 15 – охолоджувач водню

Джерелом теплоти служить проміжний теплоносій, циркуляцію якого забезпечує циркуляційний насос паралельно через утилізаційні теплообмінники відхідних газів та наддувного повітря за турбокомпресором. Схема установки

передбачає регенерацію теплової енергії в регенераційному теплообміннику. Регенерація механічної енергії виконується в гідродвигуні приводу насоса прокачування металогідридного контуру. Завдяки цьому зменшуються витрати потужності на перекачку гідридної суспензії. Дослідження проводилося стосовно пропульсивної установки газозова типу Q-max місткістю 266 тис. м³ скрапленого природного газу. В якості головного двигуна розглянуто двопаливний МОД 9G80ME-C9.5-GI фірми MAN Energy Solutions, основні характеристики якого наведено в табл. 5.11.

Таблиця 5.11 – Характеристики двигуна 9G80ME-C9.5-GI по ISO 3046/1-2002 за умов 100 % навантаження

Параметр	Розмірність	Значення
Специфікаційна тривала потужність	кВт	42390
Частота обертання	мин ⁻¹	72
Середній ефективний тиск	МПа	2,1
Тиск наддуву		0,42
Питома витрата: паливного газу	г/(кВт·год)	136,7
пілотного палива		5
Відпрацьовані гази:		
витрата	кг/с	91,2
температура ¹	К	509

Характеристики двигуна прийнято відповідно до обмежень IMO Tier II. Частка пілотного палива (MDO по ISO 8217) становить 3%. Базовий розрахунок був проведений на умови ISO: температура повітря $T_a = 298$ К; температура охолоджуючої заборотної води $T_{sw} = 298$ К.

При математичному моделюванні процесів в енергетичній підсистемі

¹ За турбокомпресором

основними параметрами є параметри (тиск, температура, витрата) робочих середовищ і вторинних енергоресурсів. Для визначення цих параметрів використовувалася on-line програма CEAS Engine Calculations, розміщена на офіційному сайті MAN Energy Solutions.

При моделюванні процесів випаровування вантажу застосовувалися методики і алгоритми, сформульовані в [59, 155]. Згідно [129, 130] основними компонентами, які випаровуються в процесі транспортування вантажу, є метан (92-98%) та азот (2-8%). Азот є баластною складовою.

Як проміжний теплоносіє був прийнятий *Therminol*® 66 – синтетична органічна рідина з максимальною робочою температурою 345 °С. Робочим тілом в металогідридному контурі прийнято суспензію $MmNi_{4,5}Al_{0,5}$ в *Therminol*® 66.

Основні параметри середовищ в циклі представлені в табл.5.12 (умови ISO).

Таблиця 5.12 – Параметри робочих середовищ

Потік	Температура, К	Тиск, МПа	Масова витрата, кг/с
Повітря			
AIR-1	298	0,10	89,50
AIR-2	471	0,42	89,50
AIR-3	353	0,39	89,50
Відпрацьовані газы			
EG-1	509	0,12	91,20
EG-2	354	0,10	91,20
Паливо			
BOG	173	0,10	1,61
NG	318	30,00	1,61
MDO	298	0,3	0,06
Контур проміжного теплоносія			
TER1-1	341	4,00	45,00
TER1-2	502	3,98	45,00
TER1-3	480	3,95	45,00
TER2-1	341	4,00	45,00

Продовження табл. 5.12

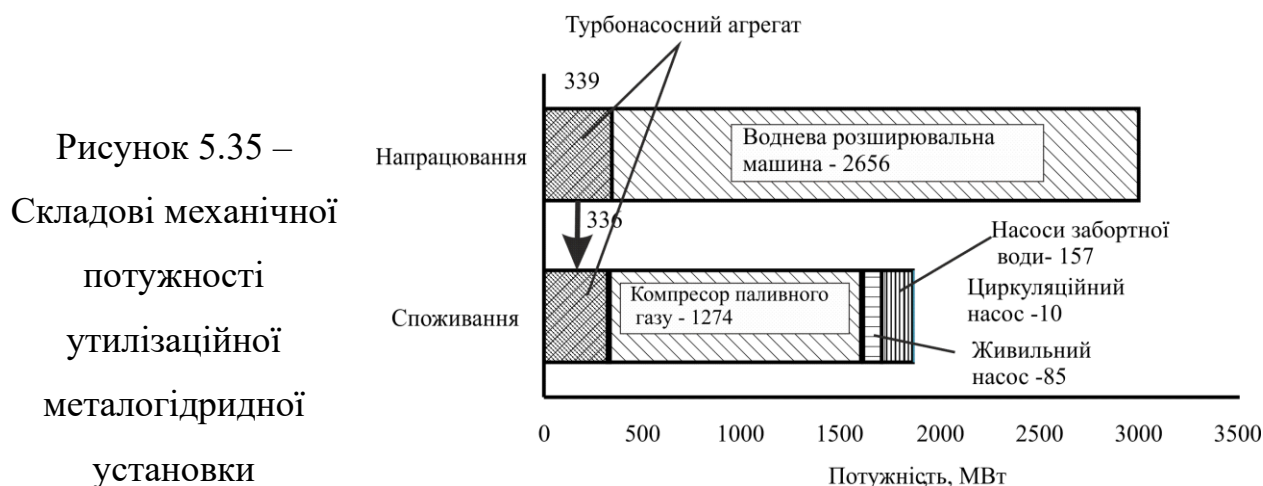
Потік	Температура, К	Тиск, МПа	Масова витрата, кг/с
TER2-2	462	3,98	45,00
TER0-1	471	3,95	90,00
TER0-2	384	3,93	90,00
TER0-3	341	3,90	90,00
Контур металогідриду			
SUSP-1	364	3,75	214,30
SUSP-2	341	3,72	214,30
SUSP-3	341	0,81	214,30
SUSR-1	308	3,19	214,0
SUSR-2	333	3,17	214,30
SUSR-3	333	3,77	214,30
Контур водню			
H2-1	364	3,77	1,150
H2-2	495	3,75	1,150
H2-3	339	0,81	1,150
H2-4	308	0,79	1,150
Контур охолоджуючої води			
SW-1	298	0,1	100
SW-2	314	0,2	100
SW1-1	298	0,1	30
SW1-2	308	0,2	30
SW2-1	298	0,1	400
SW2-2	302	0,2	400

В якості критерію ефективності утилізаційної металогідридної установки прийнято відносну потужність установки, яка представляє собою відношення механічної потужності утилізаційної установки W_e до потужності головного двигуна Ne :

$$\bar{N} = W_e / Ne. \quad (5.20)$$

Згідно з підходами, сформованими в розділі 3, механічна потужність утилізаційної установки визначалась з урахуванням витрат потужності на перекачування суспензії, а також на привід насосів циркуляції гарячого і холодного теплоносіїв (3.26).

Відносна потужність утилізаційної металогідридної установки склала 0,06. Регенерація механічної енергії дозволила збільшити потужність установки на 13% (рис. 5.35).



При моделюванні прийнято до уваги географію основних маршрутів експлуатації газовозів та вплив кліматичних умов на ефективність термохімічної утилізації.

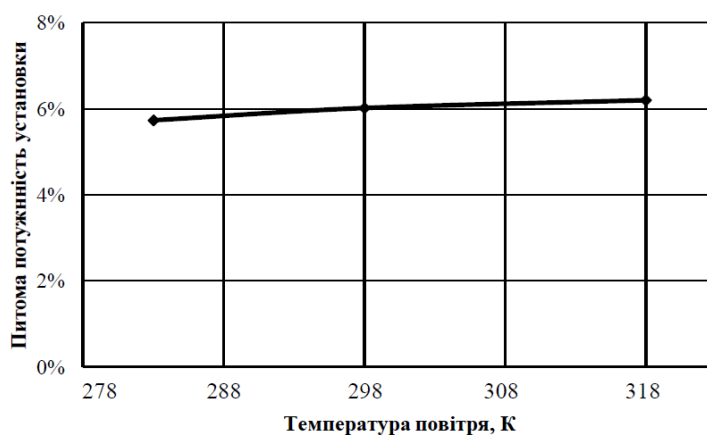
Для двох режимів (тропічні умови і помірний режим) були визначені характеристики вторинних енергоресурсів двигуна і виявлено вплив параметрів навколишнього середовища на ефективність ТХУ.

Проведені дослідження показали, що потужність утилізаційної металогідридної установки незначним чином залежить від кліматичних умов експлуатації. Зміна потужності для кліматичних умов, відмінних від ISO, склало 3-5%. Підвищення температури навколишнього середовища (тропічні умови) приводить до деякого зростання ефективності утилізації металогідридної установки (рис. 5.40).

Розрахунки показали, що корисна механічна потужність утилізаційної установки становить 2,5 МВт. Цього достатньо для приводу компресора системи подачі випару вантажу в головний двигун і вироблення близько 55 % потрібної

на ходовому режимі електричної енергії.

Рисунок 5.36 – Залежність \bar{N}
від температури
навколишнього середовища



Висновки за п'ятим розділом

1. Доведено енергетичну ефективність газотурбінних та комбінованих енергетичних модулів з термохімічною обробкою базового палива та утилізацією теплоти відпрацьованих газів ГТД в складі високотехнологічних суден та морських об'єктів нафтогазовидобування.

2. Утилізація вторинних енергоресурсів газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних судових енергетичних установок шляхом термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив забезпечує збільшення їх ККД до 4 % у порівнянні з традиційними схемами з урахуванням витрат енергії на компенсацію втрат води в циклі.

3. Для діапазону середньомасових температур газів за серійними газотурбінними двигунами судових енергетичних установок 700-820 К максимальний приріст теплоти згоряння модифікованого газоподібного вуглеводневого палива складає 18–22 %.

4. Підвищення тиску процесу термохімічної обробки газоподібних вуглеводневих палив до тиску підведення палива до ГТД (2,0–2,5 МПа) призводить до зміщення області ефективності процесу обробки до зони високих температур та зниженню приросту теплоти згоряння модифікованого палива на 50–60 %.

5. Застосування запропонованих термохімічних систем в складі судових

енергетичних установок високотехнологічних суден або плавучих об'єктів нафтогазовидобудування зменшує більш ніж в 1,5 рази викиди діоксиду вуглецю.

6. Використання технології термохімічного перетворення енергії в запропонованих металогідридних утилізаційних установках приводить до підвищення ефективності використання енергії палива на 5-6 % в пропульсивних комплексах сучасних та перспективних суден-газовозів.

Основні наукові результати розділу опубліковано в [49,50,57,59–63,122,127,128,131,155,156,169,170.174-179.183,185,187-194].

РОЗДІЛ 6

РАЦІОНАЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ В НИЗЬКОЕМІСІЙНИХ КАМЕРАХ ЗГОРЯННЯ СУДНОВИХ ГАЗОТУРБІННИХ МОДУЛІВ ПРИ РОБОТІ НА ПРОДУКТАХ ТЕРМОХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ ПАЛИВА

6.1 Розробка математичної моделі газотурбінної камери згоряння, що працює на продуктах термохімічної конверсії

6.1.1 Обґрунтування вибору моделі турбулентності газових потоків

Математичне моделювання процесів в камерах згоряння ГТД, що працюють на продуктах термохімічної обробки палива, надає можливість виявлення особливостей аеродинамічної структури реагуючих потоків в умовах турбулентної взаємодії, а також вибору раціональних геометричних параметрів пристроїв, що забезпечують необхідні екологічні параметри.

Використання методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) дозволяє проводити різноманітні розрахунки і надавати необхідну інформацію про структуру потоків в неізотермічних умовах, про розподіл концентрацій основних компонентів за перерізами камери згоряння з урахуванням складності конструктивних схем пристроїв.

При розробці моделей газотурбінної камери згоряння, що працює на продуктах термохімічної конверсії, обрано й обґрунтовано відповідні моделі турбулентності, а також модель змішування реагентів.

Ці математичні моделі приймають форму систем диференціальних і алгебраїчних рівнянь, розв'язання яких у найважливіших аспектах повністю узгоджується з характеристиками елементів пристрою, що моделюється, або процесу. Модель можна розглядати як ідеалізований опис фактично існуючих залежностей між конструктивними і робочими характеристиками хімічно реагуючої системи, з одного боку, і фундаментальними законами фізики і хімії – з іншого. Дослідження процесів хімічного реагування на рівні математичного

моделювання є, таким чином, проміжною ланкою між дослідженнями, проведеними на рівнях інженерної практики і фундаментальної науки.

Розроблена модель хімічно реагуючих потоків заснована на розв'язанні системи рівнянь, що описують конвективний та дифузійний переноси для кожного з компонентів реагуючої суміші.

Через складність фізико-хімічних процесів при побудові математичної моделі були зроблені певні допущення, які спрощують процедуру числового розв'язання:

- потік в системі являє собою багатоконпонентну хімічно реагуючу суміш термодинамічно ідеальних газів, що входять до складу палива, окиснювача і продуктів згоряння;
- течія газу тривимірна, турбулентна, усталена в часі і дозвукова;
- об'ємною в'язкістю, в'язким нагрівом, променистим теплообміном і теплообміном через стінки нехтуємо.

Запропонована математична модель заснована на рівняннях нерозривності (6.1), збереження кількості руху (6.2), збереження енергії (6.3), переносу хімічних компонентів суміші (6.4) [195–199].

Рівняння збереження маси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m. \quad (6.1)$$

Рівняння збереження кількості руху і енергії:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau_{st}) + \rho \vec{g} + \vec{F}; \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + S_h. \quad (6.3)$$

Рівняння збереження маси для окремих хімічних компонентів суміші:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i, \quad (6.4)$$

де ρ – масова густина потоку; \vec{v} – вектор локальної швидкості потоку; S_m – джерельний член, який визначає масу, що привноситься в потік будь-яким

способом; p – статичний тиск; $\rho \vec{g}$ – гравітаційна сила; \vec{F} – зовнішні сили; E – внутрішня енергія; Y_i – масова концентрація хімічного компонента i ; S_h – джерельний член, що описує тепловиділення в результаті хімічних реакцій; S_i – рівень додаткового утворення i -го компонента з дисперсної фази або інших джерел; \vec{J}_i – масова дифузія i -го компонента; R_i – рівень утворення i -го компонента в результаті хімічної реакції.

Замикання системи диференціальних рівнянь (6.1)–(6.4) відбувається шляхом додавання відповідних диференціальних рівнянь моделі турбулентності, напівемпіричних залежностей для тензора тиску, теплового і дифузійного потоків, а також рівняння стану суміші ідеальних газів. Залежність термодинамічних і теплофізичних властивостей газів від температури враховується за допомогою апроксимуючих формул.

Для стаціонарних задач прогнозування характеристик системи використано RNG різновид стандартної $k-\varepsilon$ -моделі турбулентності. RNG-модель придатна для моделювання сильно закручених потоків і течій з великою кривизною ліній струму. Модель є напівемпіричною і являє собою сукупність диференціальних рівнянь переносу кінетичної енергії турбулентності k і питомої швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності ε .

У рівняннях RNG $k-\varepsilon$ -моделі турбулентності в порівнянні зі стандартною моделлю присутні додаткові умови і співвідношення для обчислення турбулентної в'язкості, які дозволяють більш ефективно розраховувати гідродинамічні показники сильно закручених потоків.

У векторній формі транспортні рівняння RNG $k-\varepsilon$ -моделі записуються у вигляді оператора Лапласа [199]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k; \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon; \quad (6.6)$$

$$\mu_{t0} = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon; \quad \mu_t = \mu_{t0} f\left(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon}\right); \quad R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad \eta = Sk / \varepsilon; \quad (6.7)$$

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$$

і вектора швидкості потоку:

$$u = u(x, y, z, t)i + v(x, y, z, t)j + w(x, y, z, t)k.$$

У цих рівняннях: i, j, k – одиничні вектори в напрямку x, y, z ; t – час; ρ – масова густина суміші; k і ε – кінетична енергія турбулентності і питома швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності; μ_{eff} – ефективна в'язкість; G_k – генерація турбулентної кінетичної енергії в залежності від градієнтів усереднених швидкостей; G_b – генерація турбулентної кінетичної енергії в результаті дії сил плавучості; Y_M – внесок пульсаційного розширення для стислих потоків; α_k і α_ε – величини, зворотні значенням ефективного числа Прандтля для k і ε відповідно; S_k і S_ε – джерельні члени; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ – емпіричні константи моделі турбулентності; μ_{t0} – значення коефіцієнта турбулентної в'язкості, знайдене без урахування вихрових ефектів; Ω – характеристичний показник вихору, знайдений числовими методами; α_s – вихрова константа.

6.1.2 Вибір моделей хімічного реагування багатокомпонентної

газової суміші

Для розрахунків процесів горіння продуктів термохімічної конверсії в камері згоряння ГТД можуть використовуватися дві основні моделі: 1 – модель FR/ED (Finite-Rate/Eddy-Dissipation) – комбінація моделі, що враховує скінченність швидкості хімічних реакцій та розпад вихорів [197, 200]; 2 – модель EDC (Eddy-Dissipation-Concept) – розширена модель розпаду турбулентного вихору, яка містить низькорівневе моделювання хімічних процесів окиснення палива в умовах взаємодії факела з турбулентними збуреннями потоку [200].

В моделі Finite-Rate/Eddy-Dissipation швидкість реагування приймається як менше значення індексів хімічної кінетики та турбулентного перемішування. Початкове значення концентрації i -го хімічного компонента суміші в прямих і зворотних реакціях визначають наступним чином:

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} R_{i,r}; \quad k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT},$$

$$\text{де } k_{b,r} = \frac{k_{f,r}}{K_r}.$$

Молярна концентрація компонентів, що утворилися або розклалися в реакції r , визначається за формулою:

$$R_{i,j} = \Gamma(v''_{i,r} - v'_{i,r}) \cdot (k_{f,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{n'_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^N [C_{j,r}]^{v''_{j,r}}).$$

Модель EDC (Eddy-Dissipation-Concept) містить детальні механізми горіння в турбулентних течіях. Модель допускає, що реакції проходять в невеликих турбулентних структурах, званих дрібномасштабними реакторами. Швидкості реакцій визначаються з рівняння Арреніуса і інтегруються числовим методом.

Характерний розмір дрібномасштабного реактора і час, протягом якого відбувається реакція в реакторі, визначаються за формулами:

$$\xi^* = C_\xi \left(\frac{v\varepsilon}{k} \right)^{3/4}; \quad C_\xi = 2,1377; \quad \tau^* = C_\tau \left(\frac{v}{\varepsilon} \right)^{1/2}; \quad C_\tau = 0,4082,$$

де $*$ вказує на дрібномасштабність структури; $C_\xi = 2,1377$ – константа об'ємної величини. Величина ξ^* залежить від кінематичної в'язкості, кінетичної енергії турбулентності k і швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності ε .

У даній моделі використовуються реактори постійного тиску, початкові умови для яких визначаються концентрацією компонентів і температурою реагування.

Швидкості реакцій визначаються за рівняннями Арреніуса і знаходяться числовим методом за допомогою ISAT алгоритму [197]. Тоді молярна швидкість утворення/розкладання i -го компонента в реакції визначається:

$$R_i = \frac{\rho(\xi^*)^2}{\tau^* [1 - (\xi^*)^3]} (Y_i^* - Y_i),$$

де Y_i^* – масова частка i -го реагенту в реакторі після закінчення часу τ^* .

Час протікання реакції в реакторі:

$$\tau^* = C_\tau \left(\frac{v}{\varepsilon} \right)^{1/2},$$

де $C_\tau = 0,4082$ – константа часу.

При проведенні розрахунків вибираються константи швидкостей хімічних реакцій для механізму окиснення пального, що дозволяє отримувати задовільну відповідність розрахунків з експериментальними даними для подібного роду пристроїв.

Використовувана в даній роботі математична модель емісії оксидів азоту являє собою систему рівнянь масового перенесу, які враховують конвекцію, дифузію, а також утворення і розкладання NO і споріднених сполук, і отримана на основі закону збереження маси [201–203]. Вплив часу перебування реагентів в реакційному об’ємі на механізм утворення NO_x враховано в конвективних членах визначальних рівнянь, записаних в Ейлеровій системі відліку. Для термічних і швидких оксидів азоту необхідно розв’язувати рівняння переносу для NO, записане в векторній формі, засноване на рівнянні збереження маси для окремих хімічних компонентів суміші:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO},$$

де ρ – густина оксиду азоту; Y_{NO} – масова концентрація NO; D – коефіцієнт дифузії; S_{NO} – джерельний член, який визначається в залежності від механізму утворення NO_x.

6.1.3 Вибір кінетичного механізму горіння продуктів термохімічної конверсії

Дослідження сучасних камер згорання газотурбінних двигунів показують,

що пальники, розроблені відповідно до принципів часткового попереднього перемішування, мають тенденцію нестабільної поведінки при роботі з синтез-газом – паливом багатим на CO і H_2 , тоді як камери дифузійного типу показують більш стабільні результати.

Якщо паливо містить такі компоненти як CO, H_2 і CH_4 , то при числовому моделюванні процесів горіння необхідний обґрунтований вибір найбільш придатних кінетичних схем для визначення основних характеристик полум'я при розумних обчислювальних зусиллях.

Докладні розширені хімічні механізми, що описують згоряння вуглеводневого палива, були порівняно недавно розроблені для горіння сумішей CO/ H_2 . Додатково також розроблені спрощені або так звані глобальні механізми для CFD моделювання, які головним чином і застосовуються при розрахунках процесів окиснення вуглеводневих палив або синтез-газів. Наприклад, Бохні шляхом систематичного зменшення кількості реакцій розробив шестиступеневий кінетичний механізм, а Славінська запропонувала двоступеневий глобальний механізм для сумішей CO/ H_2 [204].

Для детального аналізу робочих процесів в камері згоряння, що працює на продуктах термохімічної конверсії, був застосовано спрощений 35-реакційний механізм Reduced (табл. 6.1), отриманий шляхом зменшення кількостей реакцій відомої багатореакційної кінетичної схеми GRI-Mech [205].

Основні хімічні компоненти механізму Reduced: CH_4 ; O_2 ; CO_2 ; CO; H_2O ; H; OH; O; H_2 ; HO_2 ; CH_3 ; HCO; CH_3O ; CH_2O ; H_2O_2 ; N_2 .

Так як кінетичні механізми спалювання синтез-газу містять велику кількість реакцій (більше 10), то відповідно для своєї числової реалізації вимагають використання моделей горіння, які були б в змозі прогнозувати особливості хімічного реагування в камері, не вимагаючи при цьому підвищених обчислювальних ресурсів. Такою моделлю є модель Eddy-Dissipation-Concept, що враховує взаємодію кінетики і турбулентності потоків [206, 207].

Таблиця 6.1 – Реакції хімічного механізму горіння термохімічних продуктів

$\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O};$	$\text{OH} + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{O}_2;$	$\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{H};$
$\text{OH} + \text{H} \rightarrow \text{O} + \text{H}_2;$	$\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H};$	$\text{H}_2\text{O} + \text{H} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2;$
$\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O};$	$\text{H}_2\text{O} + \text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH};$	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow$ $\text{HO}_2 + \text{M};$
$\text{HO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{OH} + \text{OH};$	$\text{HO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2;$	$\text{HO}_2 + \text{OH} \rightarrow$ $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2;$
$\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H};$	$\text{CO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{OH};$	$\text{CH}_4(+\text{M}) \rightarrow$ $\text{CH}_3 + \text{H}(+\text{M});$
$\text{CH}_3 + \text{H}(+\text{M}) \rightarrow$ $\text{CH}_4(+\text{M});$	$\text{CH}_4 + \text{H} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{H}_2;$	$\text{CH}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H};$
$\text{CH}_4 + \text{OH} \rightarrow$ $\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O};$	$\text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow$ $\text{CH}_4 + \text{OH};$	$\text{CH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{H};$
$\text{CH}_2\text{O} + \text{H} \rightarrow$ $\text{HCO} + \text{H}_2;$	$\text{CH}_2\text{O} + \text{OH} \rightarrow$ $\text{HCO} + \text{H}_2\text{O};$	$\text{HCO} + \text{H} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2;$
$\text{HCO} + \text{M} \rightarrow$ $\text{CO} + \text{H} + \text{M};$	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{O} + \text{O};$	$\text{CH}_3\text{O} + \text{H} \rightarrow$ $\text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2;$
$\text{CH}_3\text{O} + \text{M} \rightarrow$ $\text{CH}_2\text{O} + \text{H} + \text{M};$	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow$ $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2;$	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{M} \rightarrow$ $\text{OH} + \text{OH} + \text{M};$
$\text{OH} + \text{OH} + \text{M} \rightarrow$ $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{M};$	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH} \rightarrow$ $\text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2;$	$\text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2 \rightarrow$ $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH};$
$\text{H} + \text{OH} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{M};$		$\text{H} + \text{H} + \text{M} \rightarrow \text{H}_2 + \text{M};$

6.2 Перевірка адекватності розробленої моделі хімічно реагуючих потоків

Відзначимо, що математична модель континуального типу, заснована на розв'язанні рівнянь збереження та переносу в багатокомпонентній хімічно реагуючій системі, була раніше успішно застосована в Національному університеті кораблебудування для прогнозування характеристик низькоемісійних камер згоряння ГТД, що працюють на природному газі [197, 204]. При використанні числового моделювання отримано результати, які свідчать про достовірний розподіл полів температур і швидкостей в камерах згоряння ГТД різних конструктивних схем. Однак практично всі розрахунки було виконано з використанням моделі горіння Finite-Rate/Eddy-Dissipation, яка дозволяє моделювати тільки глобальні кінетичні схеми з числом реакцій, що не перевищують трьох. Це обмеження не дозволяє використовувати цю модель для розрахунків газотурбінних камер згоряння, що працюють на продуктах термохімічної конверсії. Це зумовило необхідність верифікації більш складних кінетичних схем, які передбачається використовувати для розрахунків процесів окиснення газоподібних палив різного складу в рамках моделі горіння Eddy-Dissipation-Concept.

Як об'єкт верифікації моделі обрано камеру допалювання синтез-газу ежекторного типу, розроблену компанією Applied Plasma Technologies, LLC (США) [208, 209].

В якості генератора синтез-газу розглядався піролізний пристрій для термічної переробки відходів пластика (40 %), хімічних волокон (20 %), целюлози (20 %), а також відходів хімічного виробництва (20 %).

Були прийняті наступні вихідні дані.

Для продуктів конверсії: витрата 25 г/с; температура ≤ 700 К; нижча теплота згоряння сухих продуктів конверсії – близько 27300 кДж/кг (є функцією від складу відходів); тиск продуктів конверсії – близький до атмосферного.

Для повітря: витрата через камеру допалювання 400 г/с; температура повітря 350 К.

Так як тиск одержуваних продуктів конверсії близький до атмосферного, а піролізна система передбачає циклічну роботу, то для забезпечення подачі продуктів конверсії в камеру допалювання застосована ежекторна система.

Перевірка адекватності результатів розрахунків здійснювалася шляхом зіставлення їх з експериментальними даними, отриманими при дослідженні параметрів розробленої камери допалювання на спеціалізованому стенді [208].

У числових експериментах використовувалася RNG $k-\varepsilon$ -модель турбулентності, SIMPLE-алгоритм для визначення співвідношення між швидкістю і тиском, а також схема дискретизації першого порядку точності для густини, моментів, енергії, турбулентної кінетичної енергії і рівня її дисипації.

Досліджувалися робочі процеси в камері допалювання при атмосферному тиску (101325 Па), при цьому масова витрата повітря на вході приймалася рівною від 50 до 400 г/с.

Отримані дані верифікувалися шляхом порівняння основних характеристик камери допалювання, отриманих розрахунковим і експериментальним шляхом на режимах холодної і гарячих продувок: витрати повітря, що ежектуються, та кількості токсичних компонентів на вихлопі камери допалювання.

Порівняння розрахункових і експериментальних значень основних параметрів камери допалювання на режимах холодної та гарячої продувок підтвердили адекватність моделі [208].

Аналіз отриманих результатів показує прийнятний рівень збігу експериментальних і розрахункових значень, що підтверджує адекватність обраних математичних і фізичних моделей і можливість їх використання для розрахунків камер згоряння ГТД, що працюють на продуктах термохімічної конверсії.

6.3 Дослідження характеристик робочого процесу в газотурбінній камері згоряння при роботі на продуктах термохімічної конверсії попутного газу

Дослідження, результати яких наведені в розділі 3, дозволили виявити основні параметри, які впливають на процес термохімічної конверсії попутного

газу [61, 62]. Встановлено, що зростання тиску процесу приводить до зростання температури, яка необхідна для ефективної конверсії. Крім того, підвищення тиску приводить до зростання частки пари, яку необхідно подати в реактор. Уникнути проведення конверсії при тиску нижче 2–2,5 МПа не представляється можливим, тому що ефективна організація робочих процесів в камері згоряння газотурбінного двигуна вимагає, щоб тиск подачі палива в форсунку перевищував тиск повітря за компресором.

На першому етапі, з метою виявлення особливостей роботи існуючих газотурбінних камер згоряння на синтез-газах різного складу проведено дослідження двох варіантів камери згоряння серійного двигуна UGT 2500. В першому варіанті камери реалізується дифузійний принцип горіння. В другому варіанті розглянута камера згоряння з технологією RQL. В якості палива розглядалися продукти парової конверсії метанолу [165, 166]. В результаті проведення тривимірних розрахунків отримано дані про розподіл швидкостей, температур і концентрацій хімічних компонентів в камері згоряння (рис. 6.1–6.4).

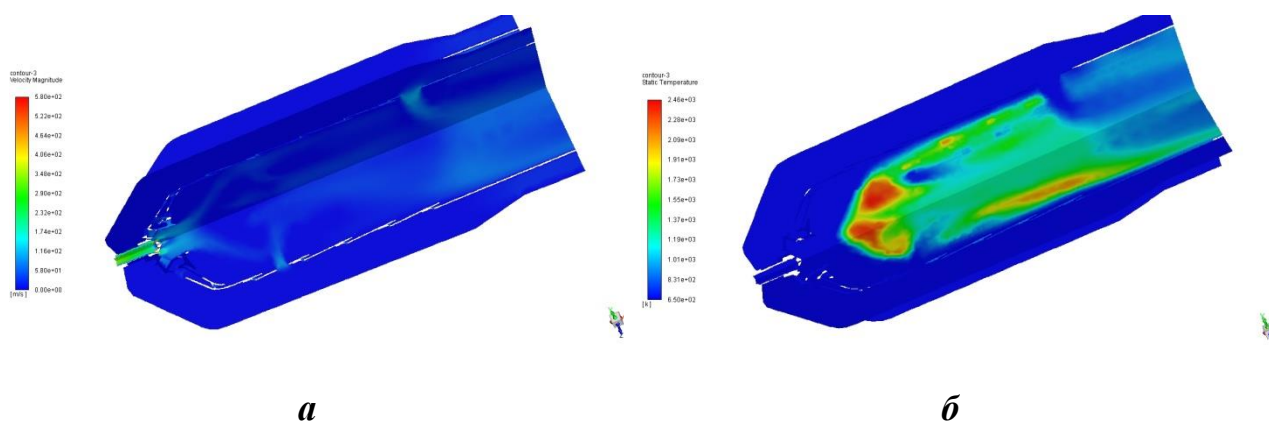


Рисунок 6.1 – Розподіл параметрів в дифузійній камері згоряння:
a - швидкості (м/с); ***б*** – температури (К)

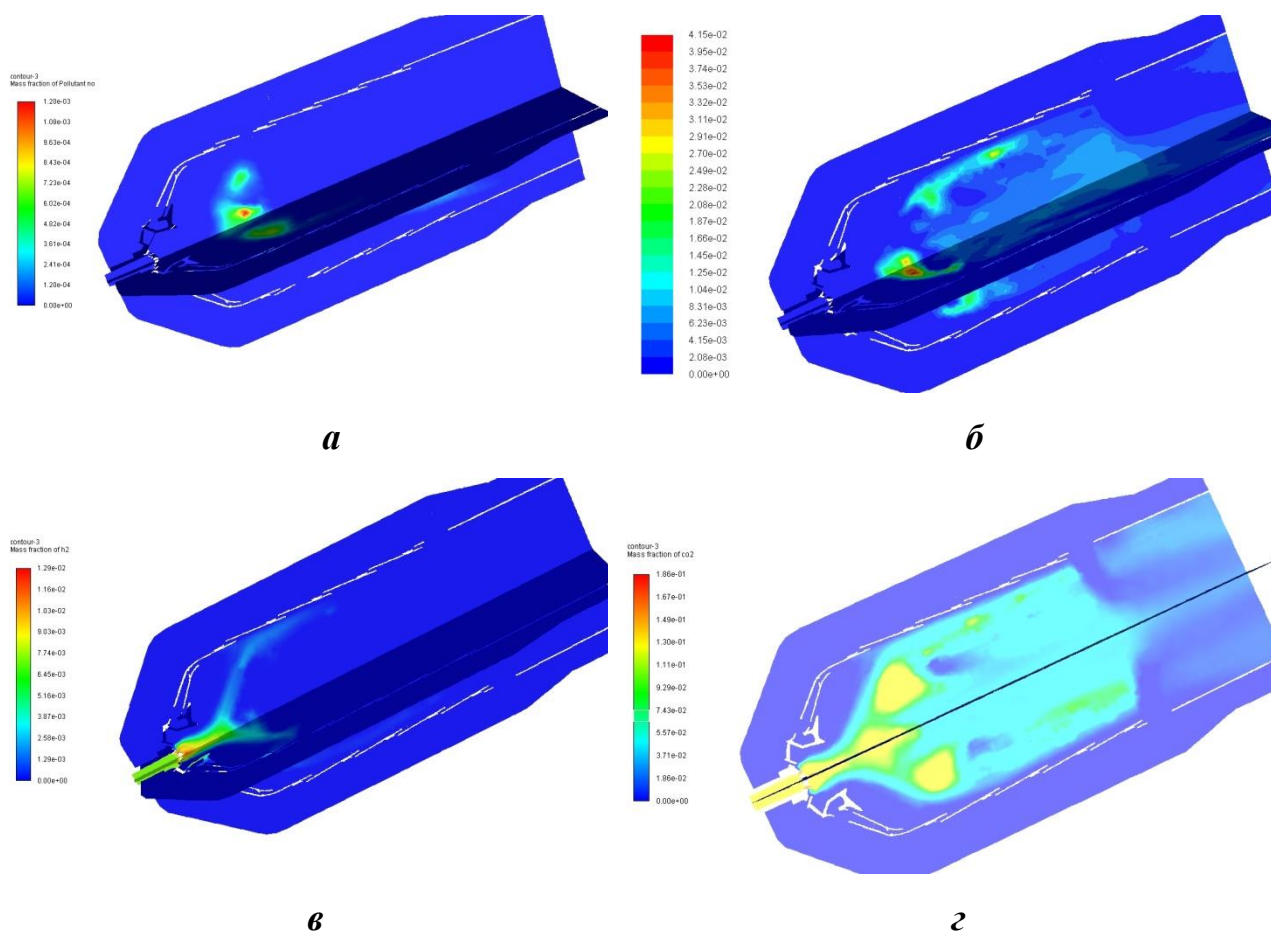


Рисунок 6.2 – Контури масових часток NO (*a*), CO (*б*), H₂ (*в*) і CO₂ (*г*) повздовж дифузійної камери згоряння

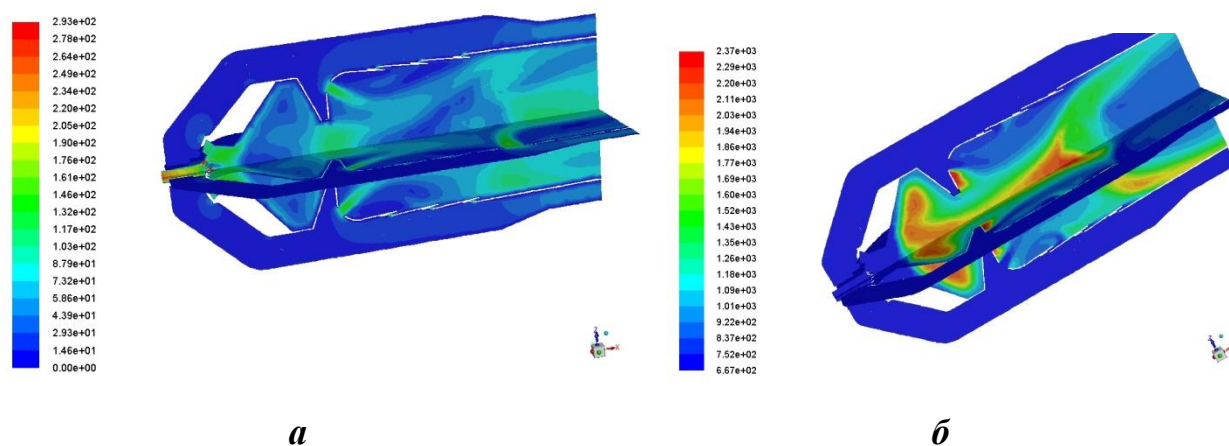


Рисунок 6.3 – Розподіл параметрів в RQL-камері згоряння:
a - швидкості (м/с); *б* – температури (К)

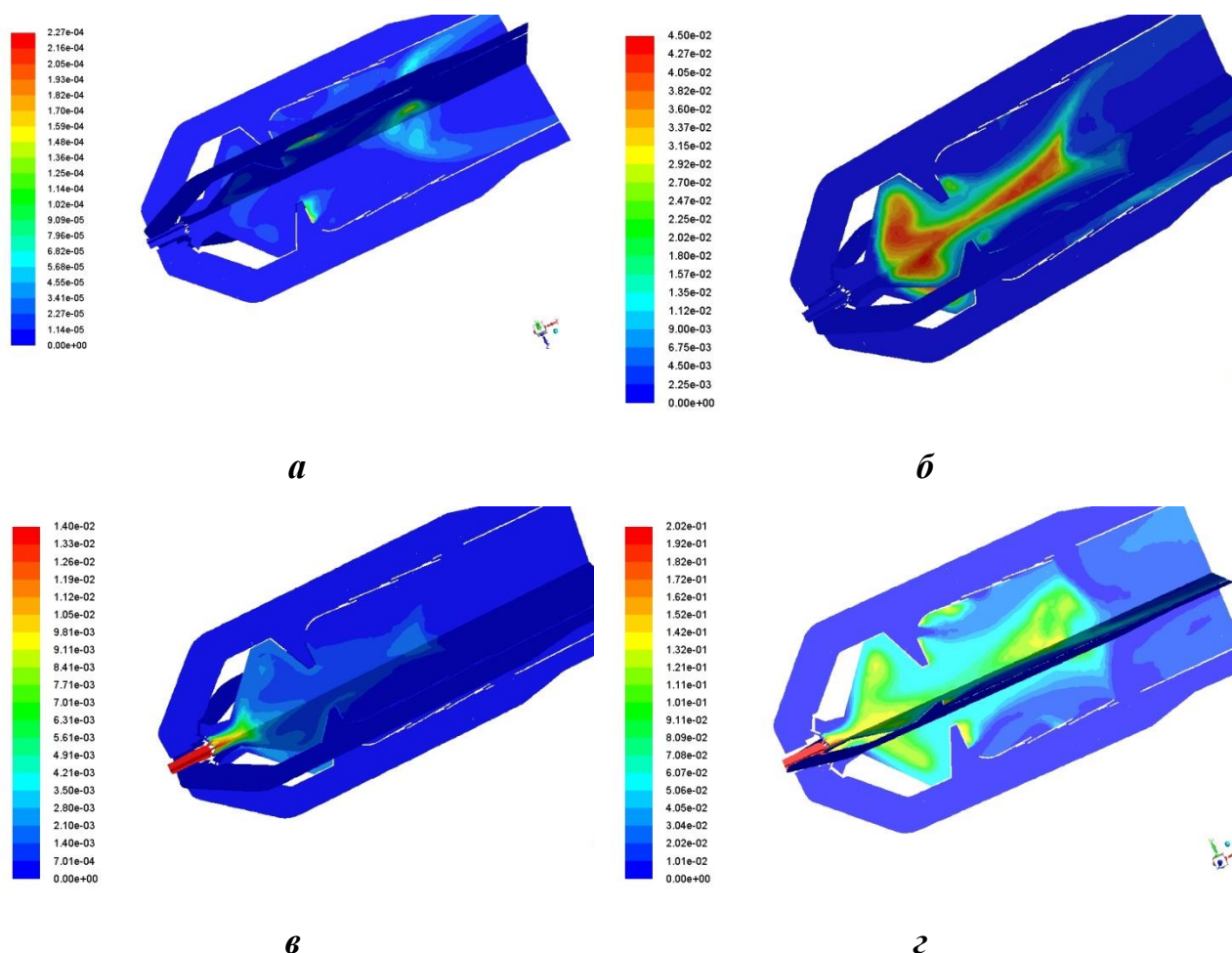


Рисунок 6.4 – Контури масових часток NO (*а*), CO (*б*), H₂ (*в*) і CO₂ (*г*) повздовж RQL - камери згоряння

Встановлено, що швидкість потоку в дифузійній камері в районі вихідного перерізу завихрювача істотно перевищує раціональний рівень. Отримані дані підтверджують результати дослідження [210], згідно з якими проста заміна природного газу (метану) на синтез-газ для серійної камери згоряння призводить до збільшення викидів токсичних компонентів.

Тривимірні розрахунки RQL-камери надали можливість встановити раціональні інтервали відношення основних геометричних параметрів [211].

За результатами досліджень встановлено, що ефективне та екологічне спалювання синтез-газу потребує модифікації серійної камери згоряння дифузійного типу.

На другому етапі досліджень методами математичного моделювання проаналізовано параметри альтернативної газотурбінної установки з паровою конверсією попутного газу шляхом утилізації скидної теплоти (рис. 6.5).

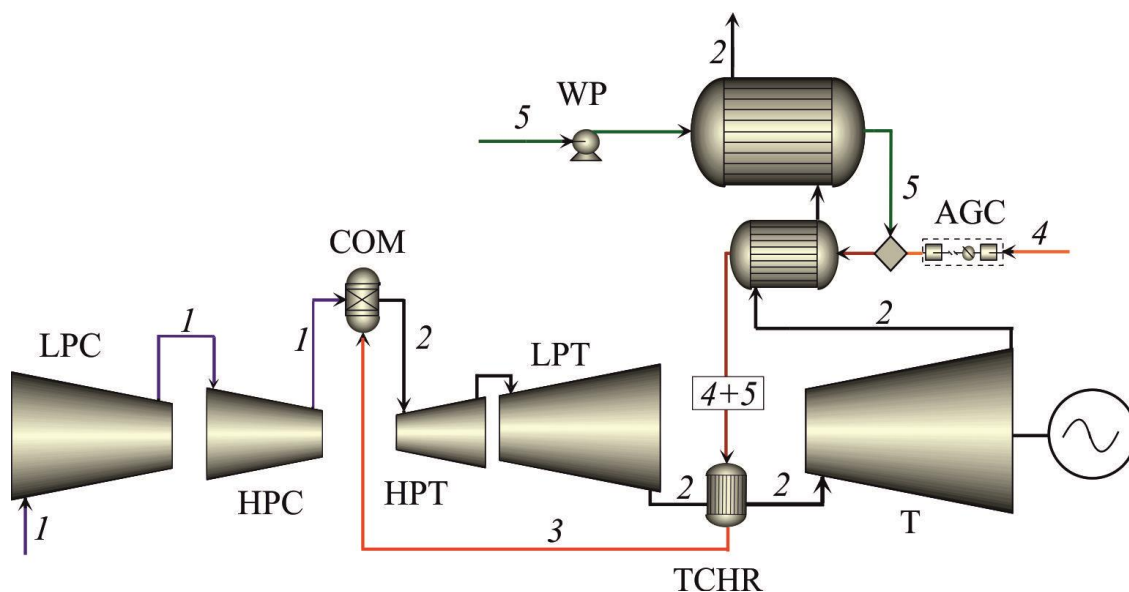


Рисунок 6.5 – Розрахункова схема газотурбінної установки:

1 – повітря, 2 – газ, 3 – синтез-газ, 4 – попутний газ, 5 – вода (пара), LPC – компресор низького тиску; HPC – компресор високого тиску; CAG – компресор попутного газу; COM – камера згоряння; SG – парогенератор; LPT – турбіна низького тиску; HPT – турбіна високого тиску; Т – силова турбіна; TCHR – термохімічний реактор; WP – водяний насос

В якості базових параметрів прийнято характеристики ГТД простого циклу типу UGT 25000. Двигун – двокаскадний, з вільною силовою турбіною, призначений для приводу генератора.

Проведені дослідження дозволили визначити наступне:

- для двокаскадного ГТД термохімічний реактор доцільно встановлювати за турбіною високого тиску;
- значне зростання об'єму робочого тіла, пов'язане з високою часткою пари, що подається в реактор, а далі в камеру згоряння і проточну частину призводить до необхідності роботи серійних ГТД на часткових режимах при використанні в якості палива продуктів парової конверсії попутного газу.

Моделювання проводилося для зазначених в табл. 6.2 параметрах турбокомпресорного блоку і наступних обмеженнях:

- ГТД працює на частковому режимі навантаження;
- температура газу перед турбіною зафіксовано;
- параметри навколишнього середовища беруться згідно ISO 19859:2016.

Таблиця 6.2 – Характеристики двигуна UGT 25000

Параметри	Значення
Число компресорів	2
Число турбін	3
Міра підвищення тиску	
КНТ	4,95
КВТ	4,36
Число жарових труб	16
Потужність при частковому навантаженні, МВт	13,5
Температура газу перед турбіною, К	1500

Попутний газ наступного складу (об'ємні частки): метан (CH_4) – 62,8–73,7 %, етан (C_2H_6) – 6,7–17,7 %, пропан (C_3H_8) – 6,1–9,0 %, бутан (C_4H_{10}) – 2,4–5,0 %, пентан та вищі вуглеводні (C_5+) – 1,0–3,7 %, вуглекислий газ (CO_2) – 0,6–9,2 %, азот (N_2) – 0,0–4,4 %, сірководень (H_2S) – 0,0–2,8 % був прийнятий як вихідне паливо [212].

З урахуванням того, що температура газів за парогенератором приймалася вище температури точки роси, максимально допустиме масове співвідношення пара/газ склало біля 6.

Використання термохімічної утилізації, як показали розрахунки, може збільшити ефективність енергетичного модуля з газовою турбіною для судна FPSO до 50 %.

Моделювання процесів термохімічної утилізації скидної теплоти дозволило встановити, що вміст вихідного попутного газу незначно впливає на склад синтез-газу. Основними компонентами синтез-газу, отриманого при термохімічній здатності синтез-газу лежать в межах 7–8 МДж/кг.

Для аналізу можливостей використання низькоемісійної камери згоряння газотурбінного двигуна для спалювання низькокалорійного синтез-газу проведено відповідні тривимірні розрахунки. Синтез-газ, що надходить до камери згоряння, має такий склад (об'ємні частки): водяна пара (H_2O) – 53,4 %, водень (H_2) – 34,9 %, оксид вуглецю (CO) – 4,3 %, вуглекислий газ (CO_2) – 6,6 %, метан (CH_4) – 0,7 %, азот (N_2) – 1,0 %.

При подальшому моделюванні робочих процесів розглядалася серійна камера згоряння двигуна UGT 25000. Низькоемісійна камера згоряння газотурбінного двигуна потужністю 25 МВт має трубчасто-кільцеву протитокову конструкцію (рис. 6.4), в якій реалізовано принцип сухого горіння частково перемішаної бідної суміші [164, 213]. Основним елементом такої камери є пальниковий пристрій, що складається з двох радіальних завихрювачів першого і другого каналів, за якими розташовані кільцеві камери змішування. Частка повітря, що надходить через завихрювач першого каналу, становить приблизно 12 % від сумарної витрати повітря через жарову трубу, а через завихрювач другого каналу – близько 61 % [214]. Паливний газ подається через ряд отворів, виконаних в лопатках радіальних завихрювачів першого і другого каналів.

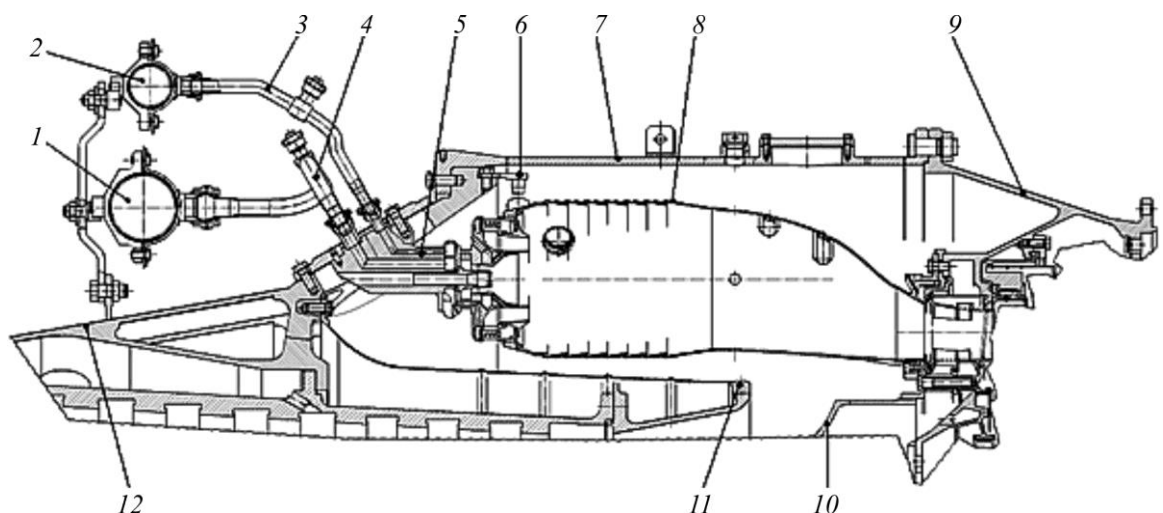
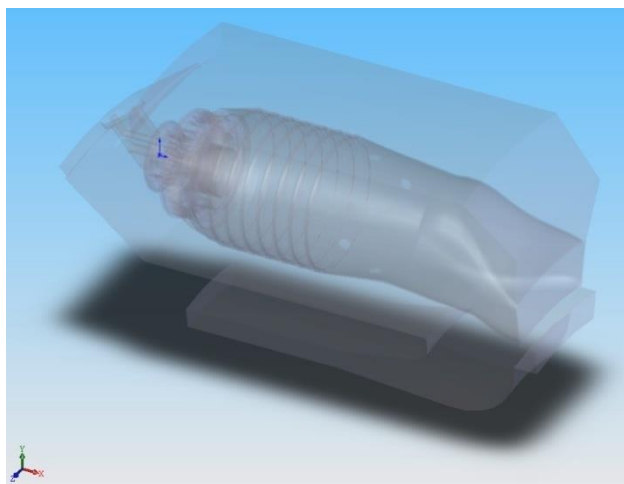
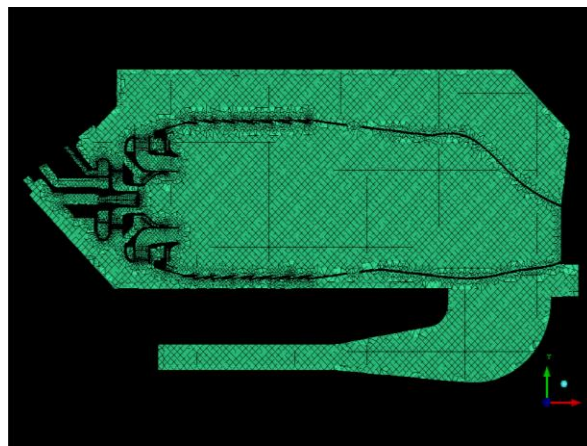


Рисунок 6.4 – Низькоемісійна камера згоряння ГТД потужністю 25 МВт: 1, 2 – колектори першого і другого каналів; 3, 4 – трубки підводу другого і першого каналів; 5 – пальниковий пристрій; 6 – фіксатор; 7 – кожух камери згоряння; 8 – жарова труба; 9 – корпус силовий; 10 – дифузор; 11 – кожух внутрішній; 12 – корпус компресора

Для проведення тривимірних розрахунків робочих процесів в камері згоряння ГТД за допомогою системи автоматизованого проектування SolidWorks побудована параметрична цифрова модель 1/16 частини камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт (рис. 6.5,*а*). Створена далі розрахункова кінцево-різницева сітка являє собою сукупність тетраедричних неструктурованих елементів. Для 1/16 частини камери згоряння сітка складається з 2,7 млн. тетраедрів (рис. 6.5,*б*) аналогічно [197].



а



б

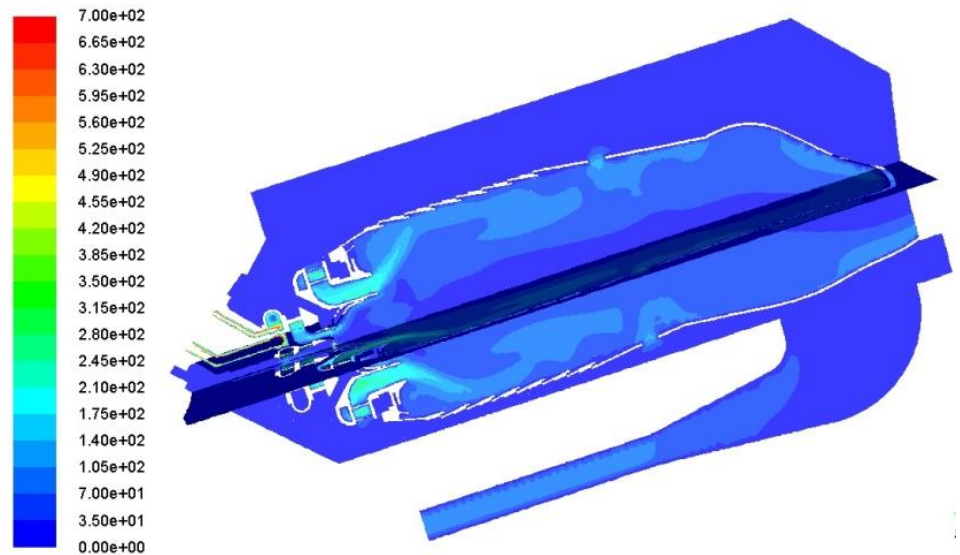
Рисунок 6.5 – Тривимірна модель камери згоряння (*а*) та розрахункова кінцево-різницева сітка (*б*)

На рис. 6.6 показана аеродинамічна структура потоку робочого тіла всередині камери згоряння. Повітря після компресора високого тиску, потрапляючи в дифузор камери згоряння, здійснює складний рух, двічі змінюючи напрямок. Після розподілу в кільцевому просторі камери повітря потрапляє в жарову трубу через отвори вторинного повітря і отвори, що організують плівкове охолодження внутрішніх поверхонь жарової труби, а потім закручується, проходячи через два радіальні завихрювача першого і другого каналів і кільцеві камери змішування в передній частині пальника.

Потік повітря, що проходить через радіальні завихрювачі першого і другого каналів, відхиляється від початкового напрямку і поширюється у вигляді спіральних закручених струменів по бічній поверхні кільцевих камер змішування в зоні фронтового пристрою. Ротаційний рух повітря приводить до

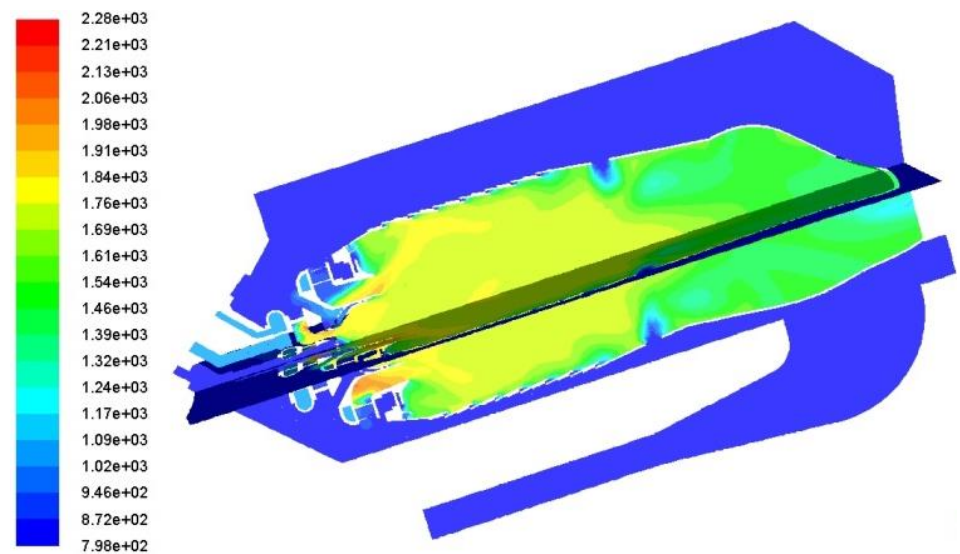
появи відцентрових сил, що викликають підвищений тиск на периферії потоку (біля стінок) і зниження тиску в його осевій частині. Таким чином, в центральній частині фронтального пристрою має місце циркулюючий зворотний потік.

Рисунок 6.6 –
Розподіл
швидкості (м/с)
всередині
камери згоряння



Ця зона рециркуляції є потужним стабілізатором горіння. Гарячі продукти згоряння циркулюють в цій зоні та запалюють свіжі порції паливо-повітряної суміші, забезпечуючи стабільне згоряння низькокалорійних продуктів конверсії попутного газу. Контури температури газу всередині камери згоряння показано на рис. 6.7.

Рисунок 6.7 –
Контури
температури (K)
всередині
камери згоряння



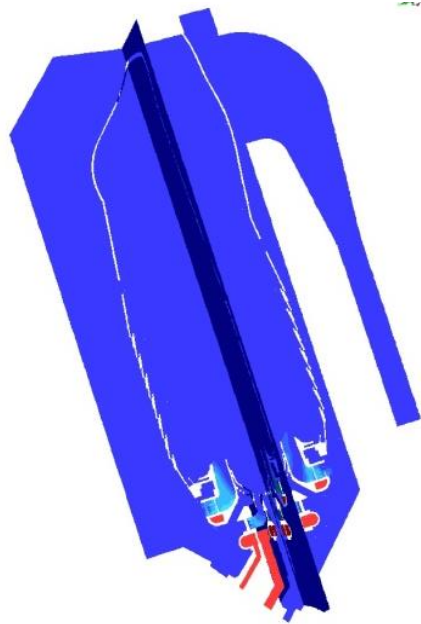
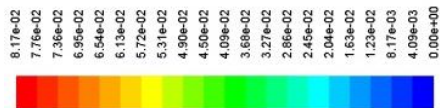
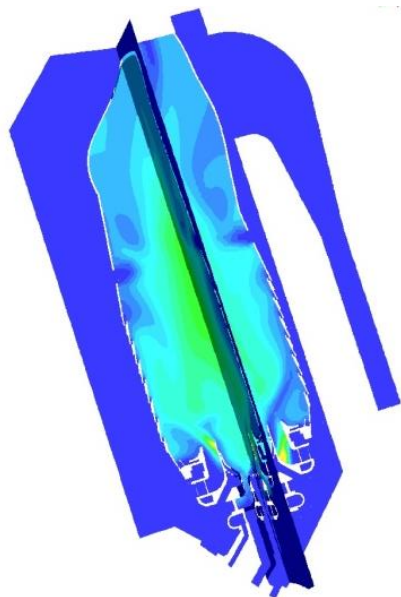
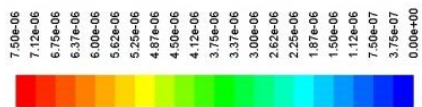
Зона максимальної температури починається в центральних передкамерних секціях, де згоряння продуктів термохімічної конверсії, незважаючи на значний

вміст водяної пари, стабілізується зоною рециркуляції. В деяких випадках для поліпшення умов стабілізації полум'я може бути запропоновано використання плазмохімічних стабілізаторів [215, 216].

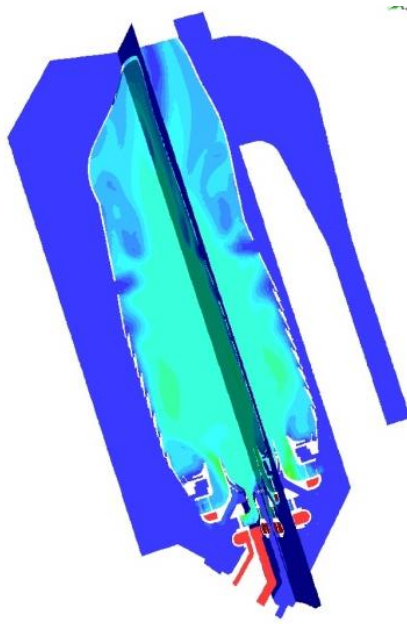
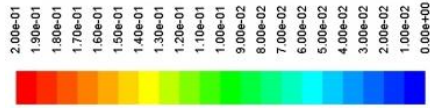
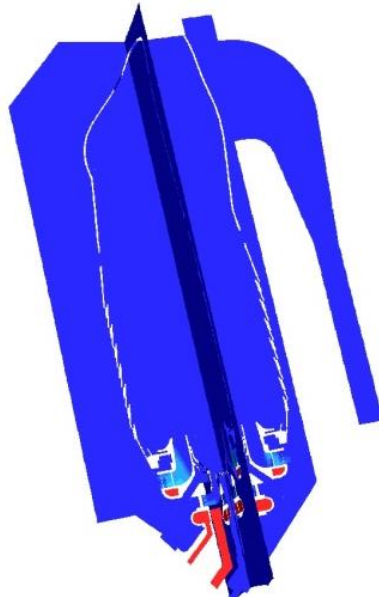
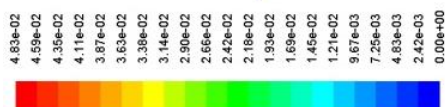
Контури масових концентрацій NO , CO , H_2 та CO_2 наведено на рис. 6.8. При низькій середній температурі полум'я під час горіння продуктів термохімічної конверсії через велику кількість пари утворення термічних оксидів азоту в об'ємі камери згоряння значно пригнічується, а розрахункова концентрація оксидів азоту в вихідному перерізі камери не перевищує 10 ppm. Це відповідає сучасним європейським стандартам на викиди токсичних компонентів газотурбінними двигунами [213].

Внаслідок присутності водяної пари реакції повного окиснення оксиду вуглецю CO затримуються певним чином, і розрахункова емісія CO на виході з камери згоряння дорівнює 85 ppm, що також не перевищує стандартні значення викидів для газових турбін. Об'ємна концентрація вуглекислого газу CO_2 на виході з камери згоряння становить 2,37 %, що менше викидів цього парникового газу газотурбінними двигунами, які працюють на природному газі.

Поряд з виявленими перевагами (висока стабільність роботи на паливах з високим вмістом пари, низька емісія токсичних компонентів), розглянута серійна камера згоряння при роботі на продуктах термохімічної конверсії потребує деяких структурних удосконалень: а) пов'язаних із запобіганням можливості проскакування полум'я в області радіальних завихрювачів за рахунок високої температури продуктів конверсії; б) зміни розмірів газопроводів подачі газу при збільшенні його витрати порівняно з природним газом; в) розробки більш ефективних засобів охолодження стінок жарової труби, особливо в передній частині пального пристрою.



a



б

в

г

Рисунок 6.8 – Контури масових часток NO (*a*), CO (*б*), H₂ (*в*) і CO₂ (*г*) всередині камери згоряння

Висновки за шостим розділом

1. Створено математичну модель хімічно реагуючих потоків в камерах згоряння ГТД, що працюють на продуктах термохімічної конверсії палив різного складу, яка дозволяє коректно прогнозувати гідродинамічні і хімічні процеси в подібних паливоспалюючих пристроях.

2. Запропонована математична модель враховує особливості протікання робочих процесів в камерах згоряння ГТД, які визначаються як фізичними процесами турбулентного сумішоутворення компонентів, так і багатоступінчастою кінетикою хімічних реакцій.

3. Для проведення розрахунків процесів окиснення продуктів термохімічної конверсії в газотурбінних камерах згоряння найбільш раціональною є модель горіння EDC (Eddy-Dissipation-Concept), яка дозволяє враховувати багатореакційні хімічні механізми в умовах взаємодії факела палива з турбулентними пульсаціями потоків.

4. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження структури течії продуктів термохімічної конверсії в камері допалювання підтвердили достовірність розробленої математичної моделі та її адекватність фізичним процесам, показали якісне і кількісне узгодження експериментальних і розрахункових характеристик.

5. Термохімічна утилізація теплоти енергетичного газотурбінного модуля судна FPSO дає змогу отримувати синтетичний газ стійкого складу, незалежно від вмісту метану в попутному газі, що використовується в якості палива. При максимально допустимому масовому співвідношенні пара/газ в межах 6–7 ККД газотурбінного енергетичного модуля морського судна становить близько 50 %.

6. Проведені тривимірні розрахунки робочого процесу в низькоемісійній камері згоряння газотурбінного двигуна потужністю 25 МВт показали можливість ефективного використання продуктів термохімічної конверсії попутного газу в якості основного палива та стабільність процесу горіння в камері згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива и окиснювача.

7. Розрахункові викиди основних токсичних компонентів (NO_x і CO) газотурбінним двигуном з термохімічною обробкою палива відповідають сучасним європейським нормам.

Основні наукові результати розділу опубліковано в [57, 61, 62, 211, 218].

РОЗДІЛ 7

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ СУДЕН І МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ НАФТОГАЗОВИДОБУВАННЯ

7.1 Основні напрямки впровадження

Основні результати дисертаційної роботи отримано в рамках Пріоритетних напрямків розвитку науки й техніки в Україні: напрямок 3 «Енергетика та енергоефективність» відповідно до тематичного плану фундаментальних науково-дослідних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова: №1987 «Теоретичні основи підвищення стійкості процесів горіння вуглеводневих палив в низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних двигунів використанням плазмохімічних стабілізаторів», № 1851 «Системні дослідження та розробка моделей програмно-цільового розвитку систем теплопостачання України на основі новітніх технологій та процесів енергоперетворення», № 1809 «Теоретичні основи процесів плазмохімічної переробки низькосортного вугілля і використання синтез-газу в газотурбінних установках», № 1837 «Новітня технологія спалювання палив з плазмовим супроводом для енергетичних систем», № М/107-2019 «Розробка передової технології SOFC-GT для суднових енергосистем».

Відповідно до сформованої в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова політики творчої співпраці з проєктними та виробничими підприємствами різних форм власності виконано також ряд ініціативних розробок за замовленням проєктних організацій та навчальних закладів (рис. 7.1).

Схемні рішення та практичні рекомендації з використання систем термохімічної утилізації в складі перспективних газотурбінних та комбінованих

установок надали можливість апробації результатів дисертаційного дослідження в практиці формування технічних завдань та технічних пропозицій при розробці концептуальних проєктів високотехнологічних суден, що задовольняють перспективним вимогам ІМО з енергоефективності.



Рисунок 7.1 – Основні напрямки впровадження результатів дослідження

Визначені діапазони ефективного застосування низки вуглеводневих та спиртових палив та отримані регресійні залежності, які описують закономірності впливу параметрів робочих процесів теплових двигунів на компонентний склад

та енергетичні характеристики продуктів термохімічної обробки, дозволили створити прикладне програмне забезпечення, яке апробоване при виконанні проєктних розробок енергетичного обладнання.

Результати дослідження впроваджено в навчальний процес ряду вищих навчальних закладів при підготовці бакалаврів та магістрів.

7.2 Реалізація результатів дослідження в практиках проєктування енергетичних комплексів високотехнологічних суден

Наведені в розділах 2-6 результати дисертаційного дослідження дозволяють реалізувати цілий ряд проєктно-конструкторських рішень, що забезпечують істотне підвищення ефективності процесів енергоперетворення в енергетичних установках високотехнологічних суден відповідно до вимог ІМО.

7.2.1 Енергетичні комплекси газовозів LNG та LPG

Використання розроблених автором математичних моделей, висновків і рекомендацій, отриманих в дисертації, надали можливість на етапі концептуального проєктування проаналізувати варіанти перспективних схемних рішень енергетичних комплексів сучасних газовозів LNG та LPG. Дослідження виконувались за замовленням підприємств «Сі-Джоб Миколаїв» та ДП «ПКБ Чорноморсуднопроєкт».

Математична модель, яка розроблена в дисертації, практично реалізує методи розрахунку процесів перетворення енергії в системах обробки вуглеводневого палива за рахунок утилізації скидної теплоти газотурбінних двигунів, а також процесів в малоемісійних камерах згоряння ГТД, які працюють на продуктах конверсії.

Це дозволило розрахувати основні характеристики запропонованих автором альтернативних схем установок з термохімічною обробкою палива та отримати узагальнені результати співставлення енергоефективності для сучасних

газовозів LNG та LPG з базовими та альтернативними енергетичними комплексами.

Враховано те, що згідно з резолюціями ІМО для багатьох груп вантажних та пасажирських суден валовою місткістю 400 і більше тон обчислюється конструктивний індекс EEDI (2.2). Нормативні вимоги до емісії CO₂ вводяться поетапно в період з 2013 по 2025 рр. та посилюються на кожному етапі [9,44].

Газовози LNG.

На першому етапі були розглянуті 10 проєктів газовозів LNG з єдиною електроенергетичною установкою (табл. 7.1), які були створені в період 2013–2019 рр. і підпадають під дію EEDI. Дедвейт суден коливався від 32 до 95 тис. т, вантажомісткість від 46 до 180 тис. м³, потужність головних двигунів від 14 до 64 МВт. Проєкти суден відбиралися з журналів Significant Ships [219].

Таблиця 7.1 – Характеристики газовозів LNG з єдиною електроенергетичною установкою

№	Назва	Рік побудови	Дедвейт, т	Енергокомплекс		
				Потужність, МВт	Тип	
					Базовий	Запропонований
1.	WOODSIDE	2013	78000	35,46	DF/D4S/EI	(DF/GTE/EI)+ +(DF/D4S/EI)
2.	ASIA VISION	2014	75400	40,95		
3.	GOLAR ESKIMO	2014	75190	40,95		
4.	CORCOVADO	2014	78600	35,10		
5.	LNG BONNY II	2015	87711	39,00		
6.	LNG FINIMA II	2015	87000	39,00		
7.	MARAN GAS ACHILLES	2015	82583	39,00		
8.	OUGARTA	2017	94600	39,00		
9.	CHRISTOPHE DE MARGERIE	2017	80000	64,35		
10.	SAGA DAWN	2019	31711	14,29	DF/D4S/M	

Відповідно до результатів дослідження розділу 5, альтернативний енергокомплекс газозову LNG запропоновано за схемою (DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI)+TXY, тобто дизель-газотурбінна єдина електроенергетична установка з підсистемою термохімічної утилізації та перетворення енергії (див. рис. 5.26). Відношення потужностей дизельної та газотурбінної частини енергокомплексу приймалось згідно з запропонованим співвідношенням

$$N_e^{DF/D4S} / N_e^{DF/GTE} < 4.$$

Вибір основного енергетичного обладнання альтернативного енергокомплексу виконувався з використанням бази параметрів дизельних і газотурбінних енергетичних модулів, фрагмент якої надано в табл. 7.2 . Кількість головних двигунів коливалась від двох (судно «SAGA DAWN», потужність 14,29 МВт, структурна схема на рис. 7.2,а) до 6 (газовоз «CHRISTOPHE DE MARGERIE», потужність 64 МВт, структурна схема на рис. 7.2,б).

Таблиця 7.2 – Параметри потужності та ефективності енергетичних модулів морського виконання на базі двопаливних двигунів [176, 221, 222]

Тип двигуна	Параметри		
	Тип передачі	EI	M
		Потужність, кВт	
		Питома витрата палива, кДж/(кВт·год)	
DF/D4S	Wartsila		
	W6L46DF	6870/7540	6870/7490
	W7L46DF	8015/7540	8015/7490
	W8L46DF	9160/7540	9160/7490
	W9L46DF	10305/7540	10305/7490
	W12V46DF	13740/7540	13740/7490
	W14V46DF	16030/7540	16030/7490
	W 16V46DF	18320/7540	18320/7490

Тип двигуна	Параметри		
	Тип передачі	ЕІ	М
	Марка ГД	Потужність, кВт Питома витрата палива, кДж/(кВт·год)	
	W 6L50DF	5700/7670	5850/7510
	W 8L50DF	7600/7670	7800/7510
	W 9L50DF	8550/7670	8775/7510
	W 12V50DF	11400/7670	11700/7510
	W 16V50DF	15200/7670	15600/7510
	MAN		
	6L35/44DF	3070/7600	3180/7515
	7L35/44DF	3580/7600	3710/7515
	8L35/44DF	4090/7600	4240/7515
	9L35/44DF	4600/7600	4770/7515
	10L35/44DF	5120/7600	5300/7515
DF/GTE	Siemens		
	SGT 100	5100/11600	-
	SGT 400	12900/10300	-
	SGT 600	24800/10300	-
	«Зоря»–«Машпроект»		
	UGT 2500	2700/12400	-

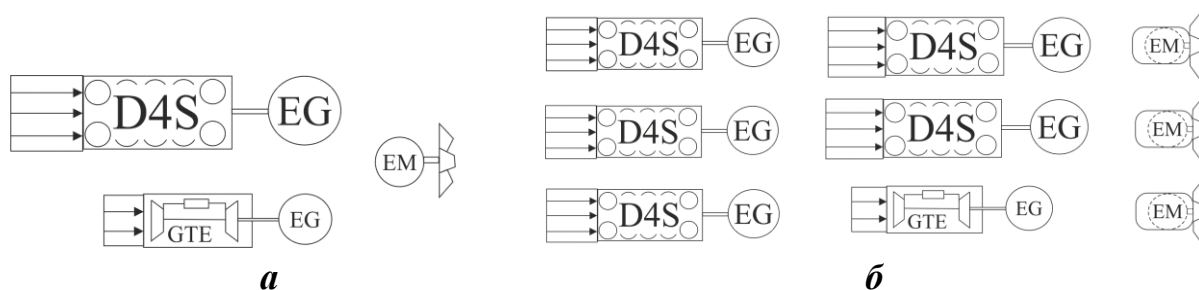


Рисунок 7.2 – Запропоновані структурні схеми енергокомплексів газовозів:
а – «SAGA DAWN»; **б** – «CHRISTOPHE DE MARGERIE»

Результати розрахунку індексу EEDI наведено на рис. 7.3.

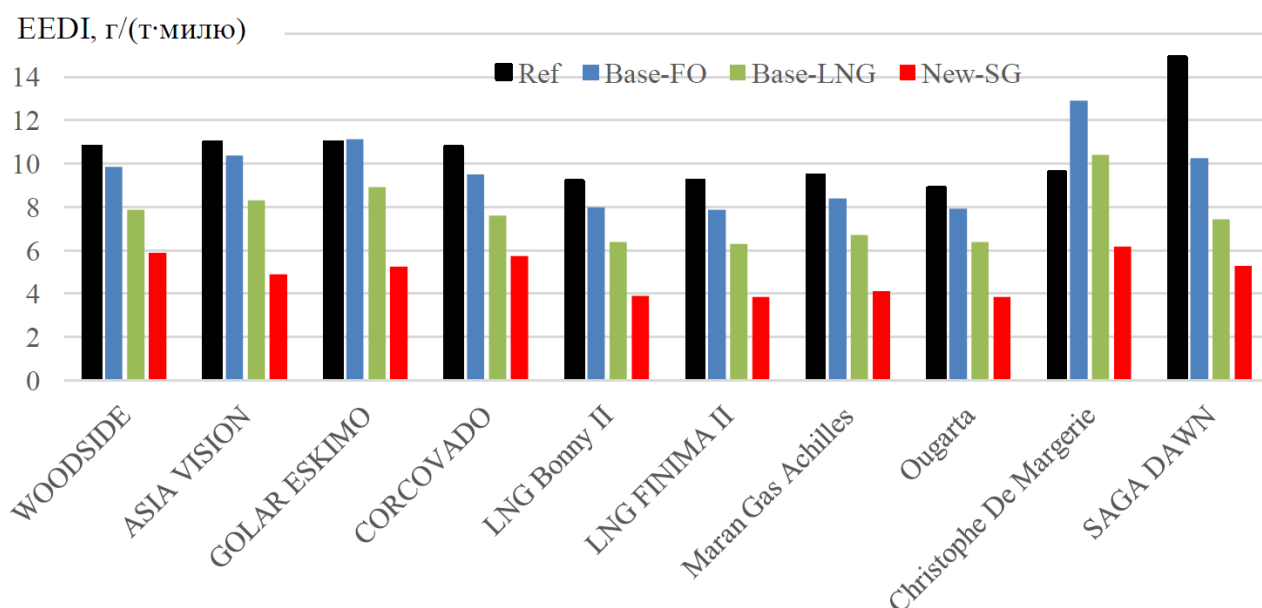


Рисунок 7.3 – Співставлення індексів енергоефективності EEDI газовозів LNG з єдиною електроенергетичною установкою:

Ref – допустиме нормативне значення EEDI, що залежить від дедвейту, типу і року побудови судна; Base-FO – EEDI судна з базовим енергокомплексом, який працює на нафтовому паливі; Base-LNG – EEDI судна з базовим енергокомплексом, який працює на випарі вантажу; New-SG – EEDI судна з запропонованим автором енергокомплексом, який оснащений підсистемою ТХУ та працює на продуктах конверсії (синтез-газі).

На рис. 7.4 надано співставлення розрахункових значень індексу енергоефективності EEDI з обмежувальними кривими вимог ІМО щодо граничних значень індексу енергоефективності для даного типу суден на різних етапах введення EEDI. Розрахунок індексу EEDI для суден з базовими енергетичними установками показав, що більшість розглянутих газовозів відповідають вимогам Етапу 1, під дію якого вони потрапляють. Однак, багато транспортних суден будуються серіями, тому для газовозів з такими ж характеристиками, що і розглянуті, але введенними в експлуатацію після 2020 і 2025 рр. буде вже недостатньо тільки переходу на природний газ, щоб відповідати жорстким вимогам Етапів 2 та 3. Проведені розрахунки індексу EEDI показують, що застосування термохімічної обробки палива дозволяє істотно зменшити емісію CO₂, що утворюється при спалюванні палива.

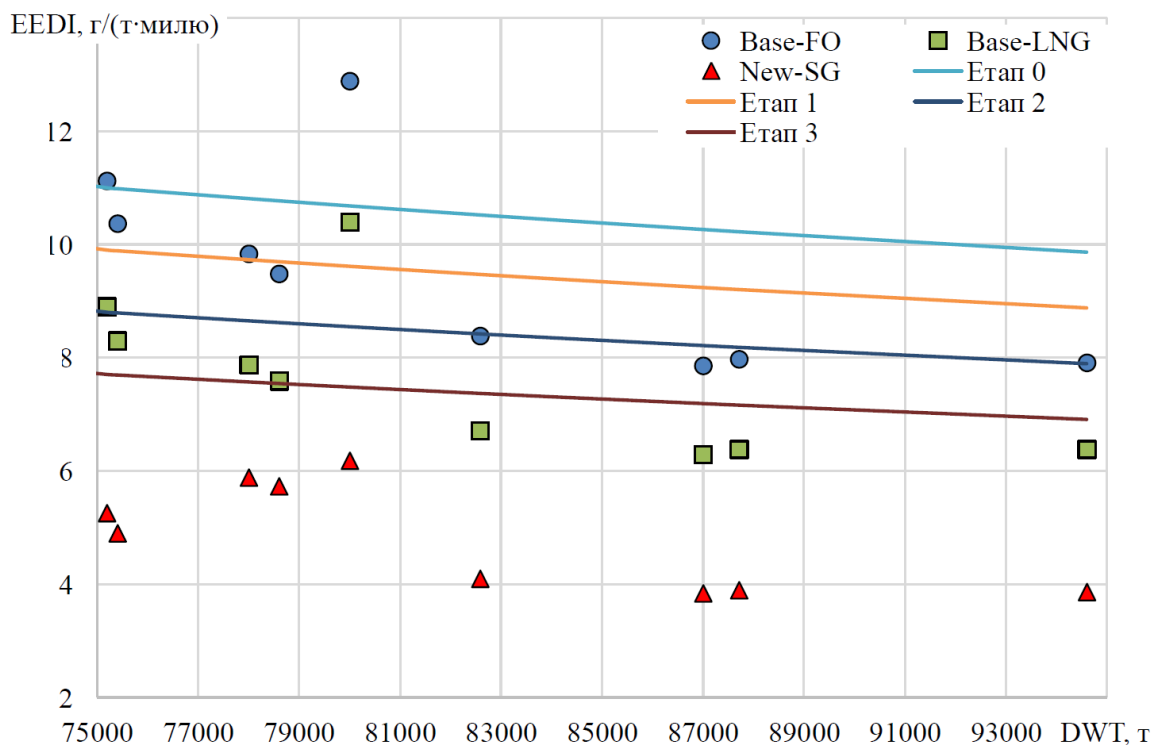


Рисунок 7.4 – Співставлення розрахункових значень індексів енергоефективності EEDI з вимогами ІМО для газовозів LNG:

Base-FO – EEDI судна з базовим енергокомплексом, який працює на нафтовому паливі; Base-LNG – EEDI судна з базовим енергокомплексом, який працює на випарі вантажу; New-SG – EEDI судна з запропонованим автором енергокомплексом, який оснащений підсистемою ТХУ та працює на продуктах конверсії (синтез-газі); Етапи 0, 1, 2, 3 – обмежувальні криві вимог ІМО

Більш детально розглянуто технічні пропозиції щодо енергетичної установки одного з найбільш сучасних та інноваційних проєктів – газовозу LNG «CHRISTOPHE DE MARGERIE» льодового класу Arc7 [87].

Базовий енергетичний комплекс конфігурації DF/D4S/EI (див. рис. 3.3) сумарною потужністю 64,35 МВт складається з шести ДВЗ фірми Wartsila: 12V50DF×4 + 9L50DF×2. Вихідна потужність двигунів 12V50DF – 11,7 МВт та 9L50DF – 8,775 МВт. Проведені розрахунки показали, що при використанні нафтових палив показник EEDI дорівнює 12,89 г/(т·миль), а при використанні випару вантажу EEDI = 10,4 г/(т·миль).

Запропонований альтернативний енергокомплекс (DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI)+ТХУ з термохімічною обробкою палива сумарною потужністю 65,55 МВт складається з ГТД Siemens SGT 400 потужністю

12,9 МВТ та п'яти ДВЗ фірми Wartsila: 12V50DF×3 + 9L50DF×2.

Розрахунки за розробленою математичною моделлю показують, що незважаючи на застосування в установці ГТД зі значно меншим, ніж в ДВЗ ККД, загальна ефективність установки практично не змінилась і становить $\approx 47\%$ (на фланцях двигунів). Це пояснюється тим, що застосування термохімічної утилізації теплоти дозволяє знизити питому витрату палива в енергокомплексі на 7% (питома витрата випару вантажу для ДВЗ зменшилась на 4% , а для ГТД на 14%). Слід відзначити, що з урахуванням досить низьких температур в арктичному регіоні, для всіх варіантів використання ГТД слід очікувати більш високих значень його ККД.

Незважаючи на те, що годинна витрата палива для базового та альтернативного енергокомплексів практично однакова та становить $9,5$ т/год, застосування ТХУ дозволяє істотно поліпшити індекс EEDI за рахунок зменшення вмісту вуглецю в паливі. Згідно з проведеними розрахунками для запропонованої установки величина EEDI складає $6,18$ г/(т·міль).

Порівняння розрахункових індексів EEDI для різних схем енергетичного комплексу судна «CHRISTOPHE DE MARGERIE» приведено на рис. 7.5.

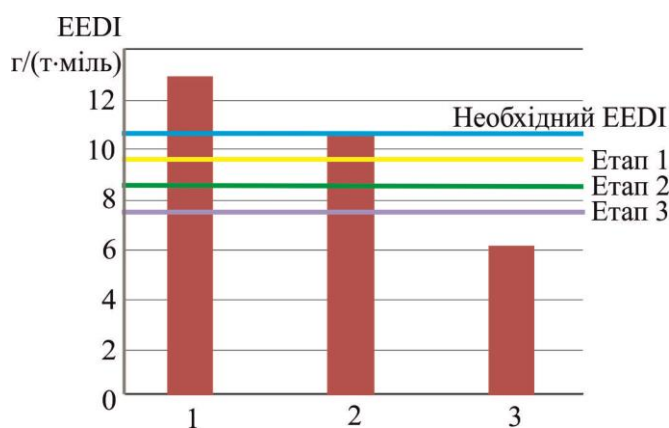


Рисунок 7.5 – Зіставлення розрахункових значень індексів EEDI для різних варіантів енергетичних комплексів LNG-газовозу «Christophe de Margerie»:

- 1 – схема DF/D4S/EI, паливо HFO; 2 – схема DF/D4S/EI, паливо BOG;
3 – запропонована схема (DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) з ТХУ, паливо BOG

Аналіз отриманих результатів показує, що навіть більш ефективний випадок роботи базового енергетичного комплексу на випару вантажу не забезпечує

енергетичну ефективність судна, яка відповідає вимогам Етапу 1 [43] (для новітніх суден, побудованих після 2017 р.). У той же час використання запропонованої установки з ТХУ забезпечує енергетичну ефективність судна навіть на рівні найжорсткіших вимог Етапу 3 щодо викидів діоксиду вуглецю.

За результатами розрахунків EEDI суден газозовів LNG доведено, що у порівнянні з традиційною єдиною електроенергетичною установкою DF/D4S/EI запропонована альтернативна схема енергокомплексу (DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) з ТХУ забезпечує суттєве зниження EEDI на 25–40 %.

Другий етап дослідження передбачав виявлення проєктних альтернатив щодо енергоефективності великих LNG газозовів з прямою передачею потужності на гвинт. Розглянуто п'ять варіантів газозовів сучасної побудови (2016 – 2019 рр.) з енергетичною установкою схеми DF/D2S/Dr на базі двопаливних малообертових ДВЗ та прямою передачею потужності на гвинт (табл. 7.3).

Таблиця 7.3 – Характеристики газозовів LNG та варіанти енергокомплексів

№	Назва	Рік побудови	Дедвейт, т	Енергокомплекс		
				Потужність, МВт	Тип	
					Базовий	Запропонований
1.	LA MANCHA KNUTSEN	2016	81700	48,96	DF/D2S/Dr	(DF/GTE/EI) +(DF/D4S/EI)
2.	BRITISH PARTNER	2018	94442	41,42		
3.	BW TULIP	2018	84187	35,21		
4.	MARAN GAS ANDROS	2019	82996	38,02		
5.	GASLOG WARSAW	2019	86900	37,00		

Попередніми розрахунками індексу EEDI встановлено, що енергоефективність енергокомплексів DF/D2S/Dr на базі двопаливних

малообертових ДВЗ вище, ніж у запропонованих альтернативних енергокомплексів конфігурації (DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) з ТХУ.

З метою виявлення проєктних альтернатив спочатку виконано аналіз головної установки газовозу LNG типу Q-мах потужністю ≈ 42 МВт. В якості основного режиму роботи розглянуто ходовий режим з вантажем. Згідно з даними [222] для газовоза LNG типу Q-мах загальносуднові потреби в електроенергії на ходовому режимі складають $\approx 2,2$ МВт. У розрахунках прийнято умови ISO 3046/1-2002: температура повітря $T_a = 298$ К; температура охолоджуючої заборотної води $T_{sw} = 298$ К.

Розглянуто два проєктні варіанти:

В1 – одновальна установка з енергокомплексом конфігурації DF/D2S/D_r на базі дизельного двигуна MAN 9G80ME-C9.5-GI з прямою передачею потужності на гвинт (рис.7.6,*a*). Специфікаційна тривала потужність двигуна 42,4 МВт. Для вироблення електроенергії на ходовому режимі передбачено дизель-генератор на базі двопаливного середньообертового дизельного двигуна MAN 9L35 / 44DF.

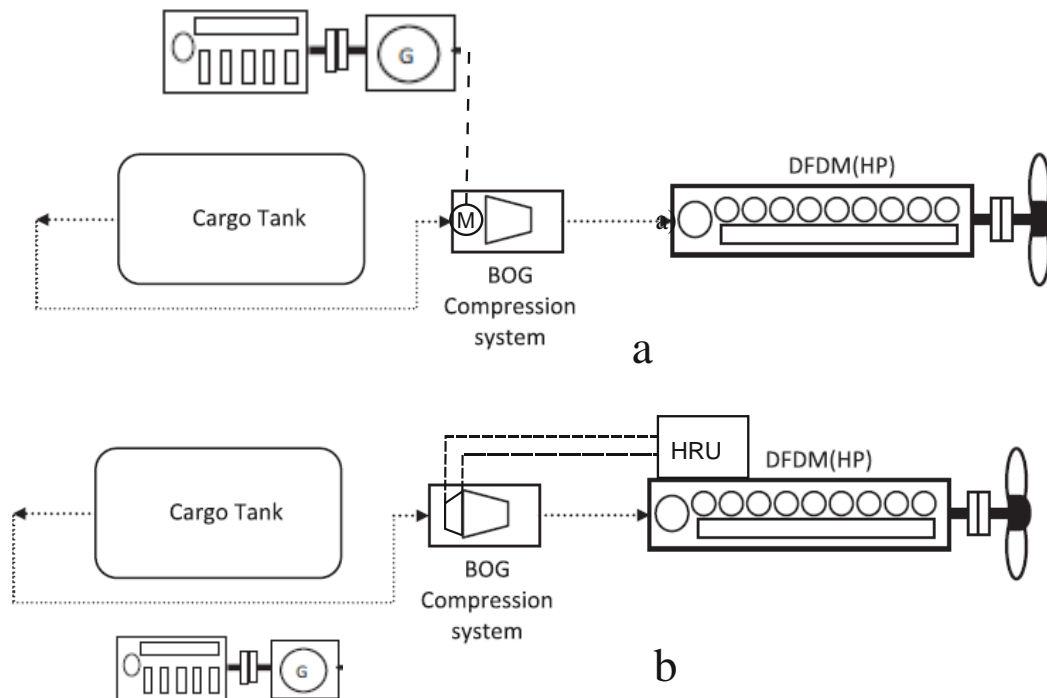


Рисунок 7.6 – Структурні схеми енергетичних установок

B2 – Схема B1 з утилізаційною металогібридною установкою для приводу компресора системи подачі випару вантажу до головного двигуна (DF/D2S/Dr+MGU) (рис.7.6,б).

Дослідження схеми B1 дозволило перевірити адекватність моделювання процесів в системі подачі BOG до головного двигуна. Витрати потужності на привід компресора паливного газу добре узгоджуються з даними фірми MAN Energy Solutions і складають близько 3 % потужності головного двигуна.

Розрахунки схеми B2 показали, що корисна механічна потужність утилізаційної металогібридної установки становить 2,5 МВт або 6 % від потужності головного двигуна. Цього достатньо для приводу компресора системи подачі BOG до головного двигуна та вироблення близько 55 % електричної енергії, яка потрібна на ходовому режимі. Це дозволяє замінити ДГ на менш потужний.

Згідно виконаним проектним розробкам при використанні в якості палива головного двигуна випару вантажу, поліпшення індексу енергетичної ефективності судна EEDI складає 35,4 % (табл. 7.4).

Таблиця 7.4 – Співставлення параметрів енергокомплексів різної конфігурації

Параметр	B1		B2	
	HFO	BOG	HFO	BOG
ККД, %	51	51	54	53,9
Питома витрата палива, кДж/(кВт·год)	7060	7065	6670	6680
Зміна EEDI, % (зниження викидів CO ₂ на транспортну роботу судна)	0	–35,4	–6,0	–40,0

Виявлено ефективність використання в складі енергокомплексів DF/D2S/Dr металогібридної утилізаційної установки, причому додаткове поліпшення індексу EEDI складає 4,6 %.

Співставлення енергоефективності газовозів LNG з енергокомплексами конфігурацій DF/D2S/Dr та DF/D2S/Dr+MGU представлено на рис. 7.7.

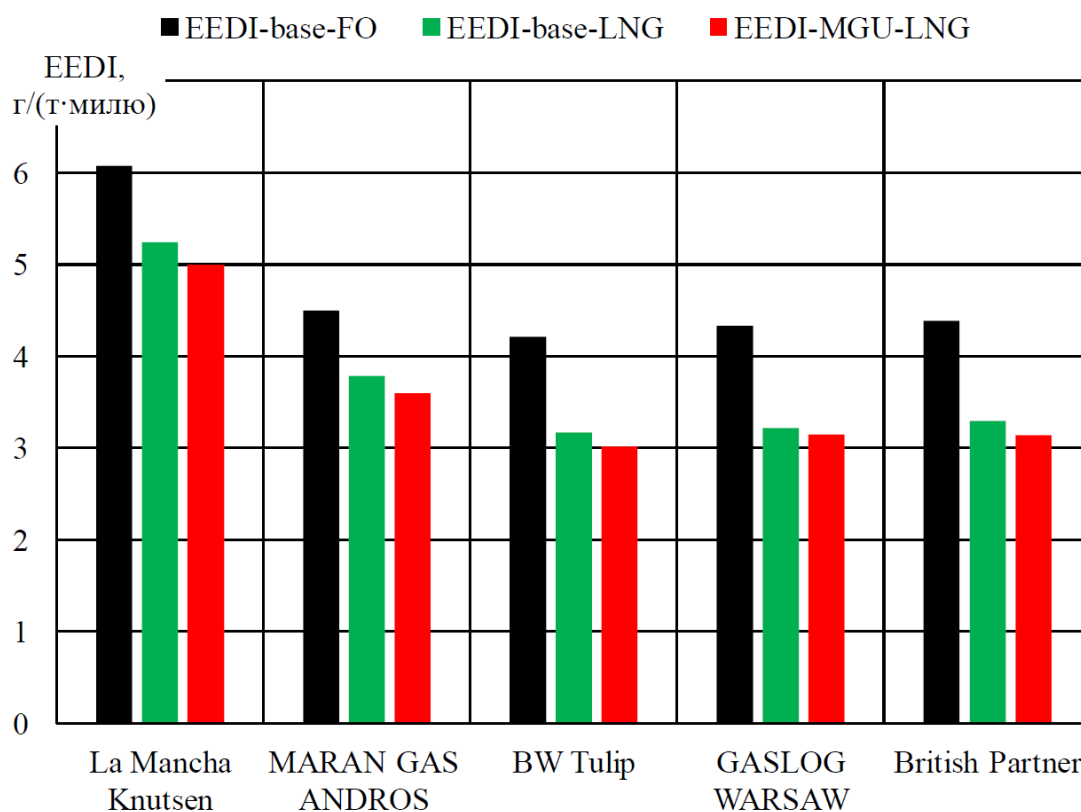


Рисунок 7.7 – Співставлення індексів енергоефективності EEDI для енергокомплексів конфігурації DF/D2S/Dr та DF/D2S/Dr+MGU при роботі на: нафтовому паливі, випарі вантажу та синтез-газі

За результатами проведених проєктно-конструкторських розробок підтверджено ефективність використання в складі енергокомплексів газовозів LNG термохімічних утилізаційних технологій. Зменшення індексу EEDI становить для газовозів LNG з єдиною електроенергетичною установкою 25–40 %; для газовозів LNG з малообертовими дизельними двигунами 4–6 %.

Газовози LPG.

Аналогічним чином проаналізовано ефективність енергокомплексів газовозів LPG. Розглянуто 8 проєктів (табл. 7.5), які були створені в період 2013–2019 рр. Дедвейт суден складає від 24,1 до 54,5 тис. т. Потужність енергетичних установок коливалась в межах від 11,7 до 21,3 МВт, діапазон потужностей ГД – від 7,8 МВт до 16 МВт. Проєкти суден відбиралися з журналів Significant Ships [219].

Таблиця 7.5 – Характеристики газовозів LPG та складу енергокомплексів

№	Назва (дедвейт, т)	Рік побудови	Потужність,		Тип базового енергокомплексу, (кількість ГД × потужність ГД, МВт)	Тип альтернативного енергокомплексу, (кількість ГД × потужність ГД, МВт)
			ГД	ЕУ		
			МВт			
1.	CLIPPER QUITO (24100)	2013	12,6	16,44	DF/D2S/Dr (1×12,6)	(DF/GTE/El)+(DF/D4S/M) (1×5,1+1×11,7)
2.	GAS STAR (51700)	2014	12,6	16,2	DF/D2S/Dr (1×12,6)	(DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) (1×5,1+1×11,7)
3.	SEA BIRD (51740)	2015	12,4	14,96	DF/D2S/Dr (1×12,4)	(DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) (1×5,1+1×10,3)
4.	ANDERIDA (47981)	2017	12,02	15,92	DF/D2S/Dr (1×12,02)	(DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) (1×5,1+1×11,7)
5.	TRAMMO DIETLIN (24100)	2017	7,8	11,7	DF/D2S/Dr (1×7,8)	(DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) (1×2,7+1×8,78)
6.	VIVIT DUBHE (50877)	2019	14	17,2	DF/D2S/Dr (1×14,0)	(DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) (1×5,1+1×11,7)
			ГД	ЕУ		
			МВт			
7.	JS INEOS MARLIN (51312)	2019	16,08	21,28	DF/D2S/Dr ¹ (1×16,08)	(DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) (1×5,1+2×7,8)
8.	MATTERHORN EXPLORER (47248)	2019	13,5	17,7	DF/D2S/Dr (1×13,5)	(DF/GTE/El)+(DF/D4S/El) (1×5,1+1×11,7)

Запропонований альтернативний енергокомплекс газовозу LPG обрано за схемою (DF/GTE/El)+(DF/D4S/M)²+ТХУ з підсистемою термохімічної утилізації та перетворення енергії.

Відношення потужностей дизельної та газотурбінної частини енергокомплексу приймалось з співвідношення $N_e^{DF/D4S} / N_e^{DF/GTE} < 4$.

¹ Базове паливо – етан

² За виключенням судна CLIPPER QUITO, де застосована схема (DF/GTE/El)+(DF/D4S/M)

Вибір основного енергетичного обладнання альтернативного енергокомплексу здійснювався з використанням бази параметрів дизельних і газотурбінних енергетичних модулів (табл. 7.2).

Кількість головних двигунів енергокомплексу: один ГТД та 1-2 ДВЗ (рис. 7.8).

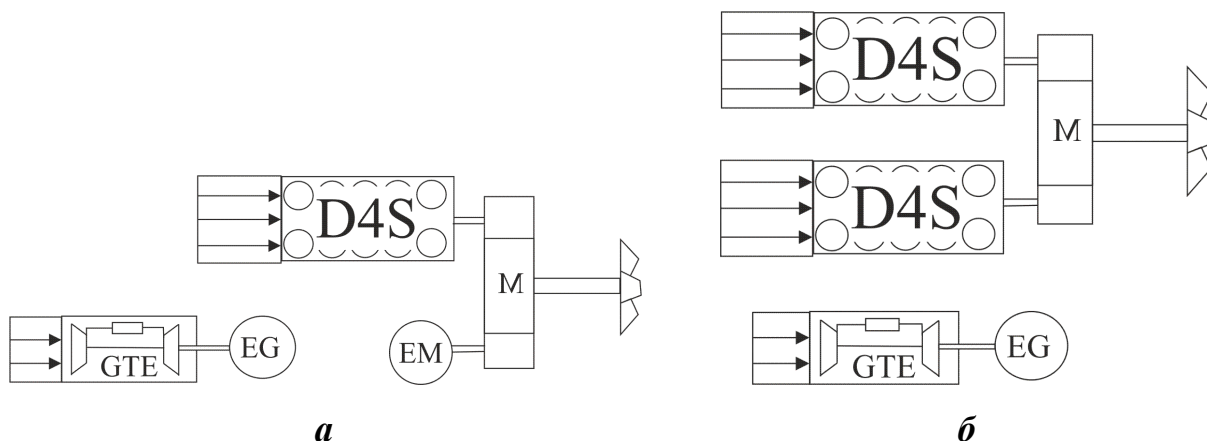


Рисунок 7.8 – Структурні схеми запропонованих альтернативних енергокомплексів газовозів LPG:

а – з одним ДВЗ (судно «CLIPPER QUITO»);

б – з двома ДВЗ (судно «JS INEOS MARLIN»)

Для кожного проєкту розраховано наступні значення індексу енергоефективності судна: Ref – допустиме нормативне значення індексу енергетичної ефективності; Base-FO – індекс енергоефективності судна з базовим енергокомплексом, який працює на нафтовому паливі; Base-LPG – індекс енергоефективності для судна з базовим енергокомплексом, який працює на LPG (пропан); New-SG – індекс енергоефективності для судна з альтернативним енергокомплексом, який оснащено підсистемою ТХУ та працює на продуктах конверсії пропану (синтез-газі). Результати приведено на рис. 7.9 та 7.10.

Аналіз отриманих результатів показує, що базовий варіант енергетичної установки з роботою головних двигунів на нафтовому паливі не відповідає перспективним вимогам ІМО.

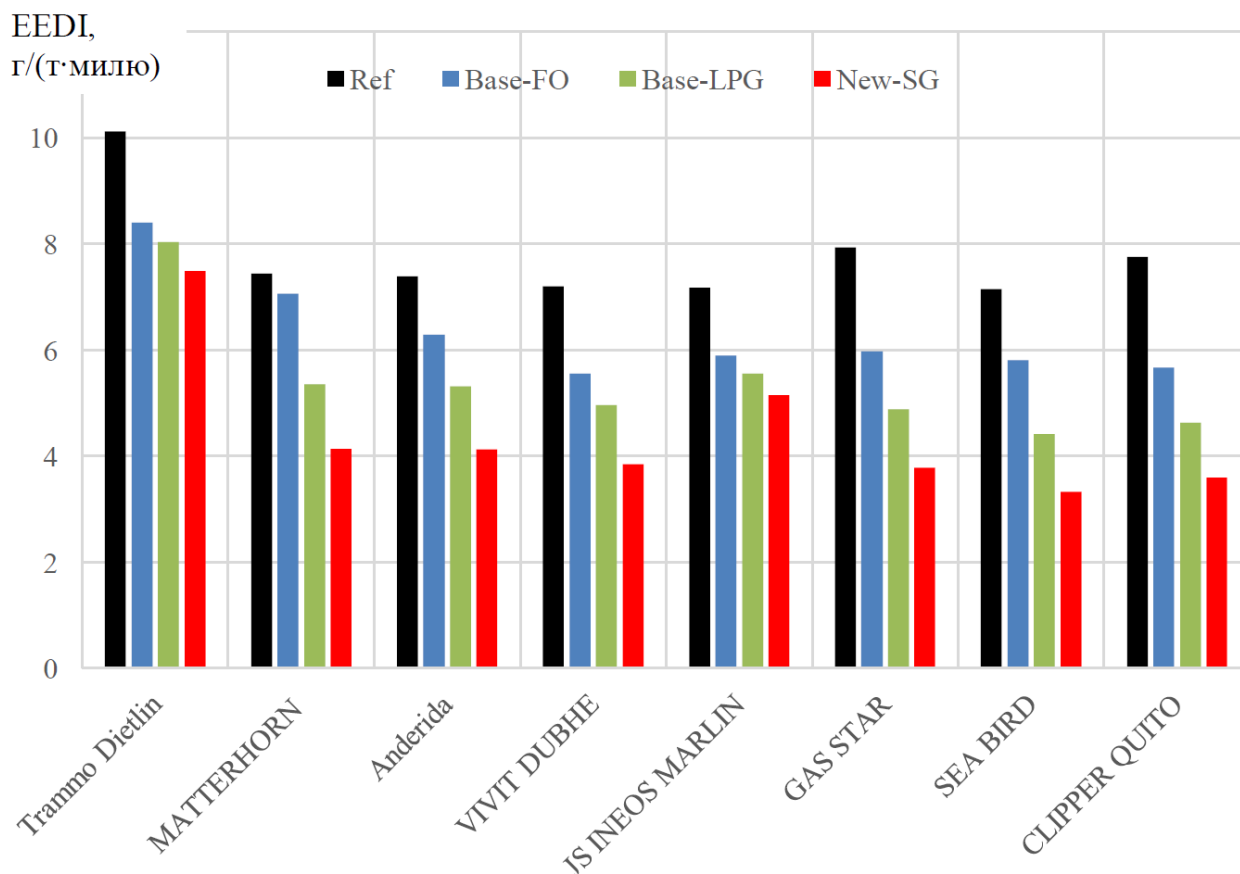


Рисунок 7.9 – Співставлення значень індексів EEDI газовозів LPG для базових та альтернативних варіантів енергокомплексів при роботі на нафтовому паливі, пропані та синтез-газі

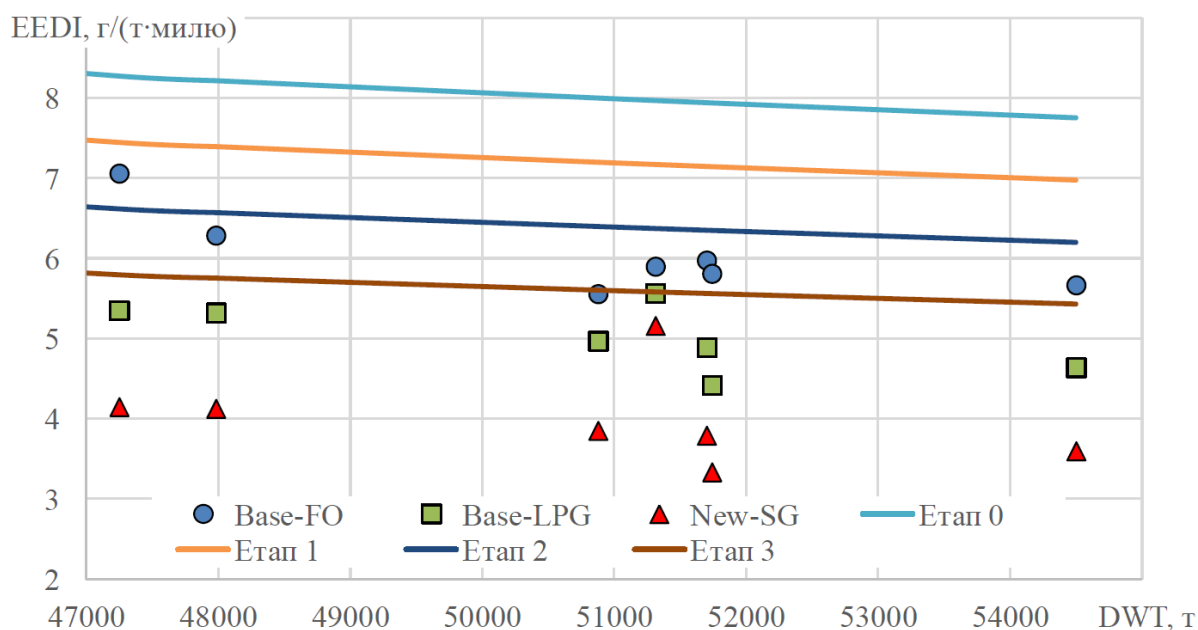


Рисунок 7.10 – Співставлення розрахункових значень індексів енергоефективності EEDI з вимогами ІМО для газовозів LPG
Аналогічно газовозам LNG для суден-газовозів LPG виявлено суттєвий

вплив запропонованої термохімічної утилізації скидної теплоти на поліпшення індексу EEDI та підвищення енергоефективності судна в цілому. Застосування термохімічних технологій підвищує енергоефективність газозовів LPG на 30–42 % в порівнянні з енергокомплексами, які працюють на нафтових паливах, та на 22–24 % в порівнянні з енергокомплексами, які працюють на LPG.

7.2.2 Енергетичні комплекси круїзних лайнерів та суден Ro-рах

З метою визначення відповідності запропонованих схем та параметрів енергетичних комплексів високотехнологічних суден вимогам ІМО з енергоефективності проведено проєктну розробку модернізації енергетичних комплексів круїзних лайнерів та суден Ro-рах (у тому числі поромного типу). Робота виконана за замовленням підприємств «Zaliv Ship Design», «Сі-Джоб Миколаїв» та ДП «ПКБ Чорноморсуднопроєкт».

Розглянуто 10 проєктів круїзних лайнерів та 5 проєктів суден Ro-рах (табл. 7.6), які створено в період 2013–2019 рр. Проєкти суден відбиралися з журналів Significant Ships [219].

Таблиця 7.6 – Характеристики круїзних лайнерів, суден Ro-рах та склад енергокомплексів

№	Назва (водотоннажність, GRT)	Рік побу- дови	Потужність, МВт		Тип базового енергокомплексу, (кількість ГД × потужність ГД, МВт)	Тип альтернативного енергокомплексу, (кількість ГД × потужність ГД, МВт)
			ГД	ЕУ		
Круїзні лайнери						
1.	EUROPA 2 (42830)	2013	24	24	DF/D4S/EI (4×6,0)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) (1×5,1+2×9,1)
2.	COSTA DIADEMA (133000)	2014	52	52	DF/D4S/EI (4×12,6+2×0,8)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) (1×24,8+2×11,4+1×5,7)
3.	MEIN SCHIFF 3 (99526)	2014	48	48	DF/D4S/E (2×14,4+2×9,6)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/E) (1×24,8+2×11,4)

№	Назва (водотоннажність, GRT)	Рік побу- дови	Потужність, МВт		Тип базового енергокомплексу, (кількість ГД × потужність ГД, МВт)	Тип альтернативного енергокомплексу, (кількість ГД × потужність ГД, МВт)
4.	VIKING STAR (47842)	2015	23,52	23,52	DF/D4S/EI (2×6,72+2×5,04)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) (1×5,1+2×9,1)
5.	AIPA PRIMA (125572)	2016	46,8	46,8	DF/D4S/EI (3×12 + 1×10,8)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) (1×24,8+2×11,4)
6.	KONNIGSDAM (99836)	2016	50,4	50,4	DF/D4S/EI (4×12,6)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) (1×24,8+2×10,3+1×6,9)
7.	SEABOURN (41865)	2016	23,04	23,04	DF/D4S/EI (4×5,76)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) (1×5,1+1×7,6+2×5,7)
8.	SEVEN SEAS EXPLORER (55254)	2016	36	36	DF/D4S/EI (4×8,0)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) (1×24,8+2×5,7)
9.	MSC SEASIDE (153516)	2017	62,4	62,4	DF/D4S/EI (2×14,4 + 2×16,8)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) (1×24,8+2×11,4+2×8,6)
10.	SPIRIT OF DISCOVERY (58119)	2019	21,6	21,6	DF/D4S/EI (4×5,4)	DF/GTE/EI)+(DF/D4S/EI) (1×5,1+2×5,7)
Пороми Ro-рах						
1.	NEW SHIDAO PEARL	2018	13,9	16,3	DF/D4S/M (2×7,0)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/M) (1×5,1+1×11,7)
2.	NEW GOLDEN BRIDGE VII	2018	24	29,2	DF/D4S/M (2×12,0)	DF/GTE/EI)+(DF/D4S/M) (1×5,1+2×11,7)
3.	W B YEATS	2018	33,6	39,7	DF/D4S/M (4×8,4) ¹	DF/GTE/EI)+(DF/D4S/M) (1×12,9+2×13,7)
4.	HYPATIA DE ALEJANDRÍA	2019	20,6	24,5	DF/D4S/M (2×10,3)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/M) (1×5,1+2×10,3)
5.	ZHONG HUA FU XING	2019	14,0	17,2	DF/D4S/M ¹ (2×7,0)	(DF/GTE/EI)+(DF/D4S/M) (1×5,1+2×5,7)

Водотоннажність розглянутих круїзних лайнерів складає 41,9–153,5 тис. т., діапазон потужності енергокомплексів 21,6–62,4 МВт, кількість ГД від 3 до 5.

¹ Газоподібне паливо – пропан.

Запропонований енергокомплекс для круїзних лайнерів обрано за схемою (DF/GTE/El)+(DF/D4S/El)+ТХУ (структурна схема аналогічна схемі рис. 7.1,**б** і відрізняється тільки кількістю ГД).

Для суден Ro-рах середнє значення дедвейту складає 7,5 тис. т., потужність енергокомплексу коливається від 16 до 40 МВт, кількість ГД від 2 до 4. Альтернативний енергокомплекс прийнято за схемою (DF/GTE/El)+(DF/D4S/M)+ТХУ (структурна схема аналогічна схемі рис. 7.9,**б**).

Для кожного проєкту круїзних лайнерів розраховано наступні значення індексу енергоефективності судна: Ref – допустиме нормативне значення індексу енергетичної ефективності; Base-FO – індекс енергоефективності судна з базовим енергокомплексом, який працює на нафтовому паливі; New-LNG – індекс енергоефективності для судна з альтернативним енергокомплексом, який працює на LNG; New-SG – індекс енергоефективності для судна з альтернативним енергокомплексом, який оснащений підсистемою ТХУ та працює на продуктах конверсії LNG (синтез-газі). Результати для круїзних лайнерів надано на рис. 7.11 та 7.12.

Застосування запропонованих термохімічних утилізаційних технологій підвищує енергоефективність круїзних суден на 15-25 % відносно енергокомплексів, які працюють на нафтових паливах, та на 10–15 % відносно енергокомплексів, які працюють на LNG.

Для суден Ro-рах розраховано наступні значення індексу енергоефективності судна: Ref – допустиме нормативне значення індексу енергетичної ефективності; Base-FO – індекс енергоефективності судна з базовим енергокомплексом, який працює на нафтовому паливі; New-SG – індекс енергоефективності для судна з альтернативним енергокомплексом, який оснащений підсистемою ТХУ та працює на продуктах конверсії LNG (синтез-газі). Результати надано на рис. 7.13¹.

¹ Для двох суден в якості базового газоподібного палива був розглянутий пропан.

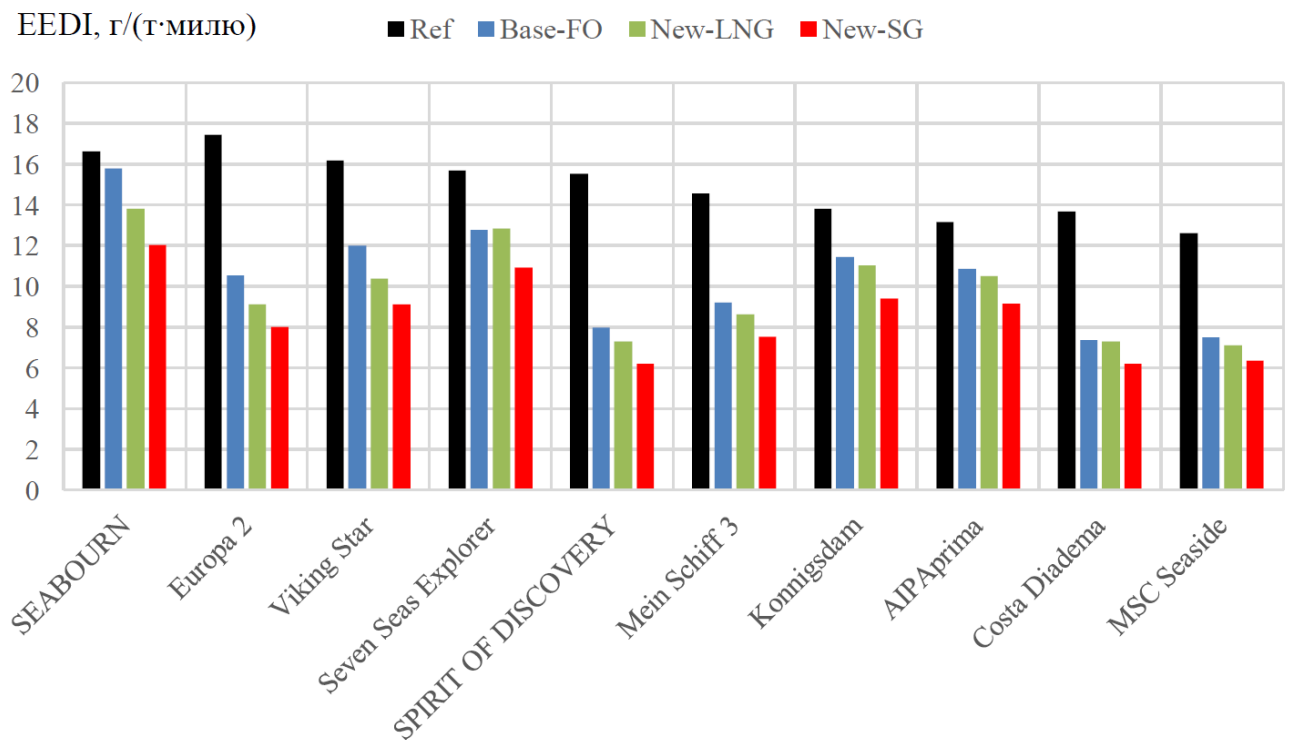


Рисунок 7.11 – Співставлення індексів енергоефективності судна EEDI для базових та альтернативних варіантів енергокомплексів круїзних лайнерів при роботі на нафтовому паливі, LNG та синтез-газі

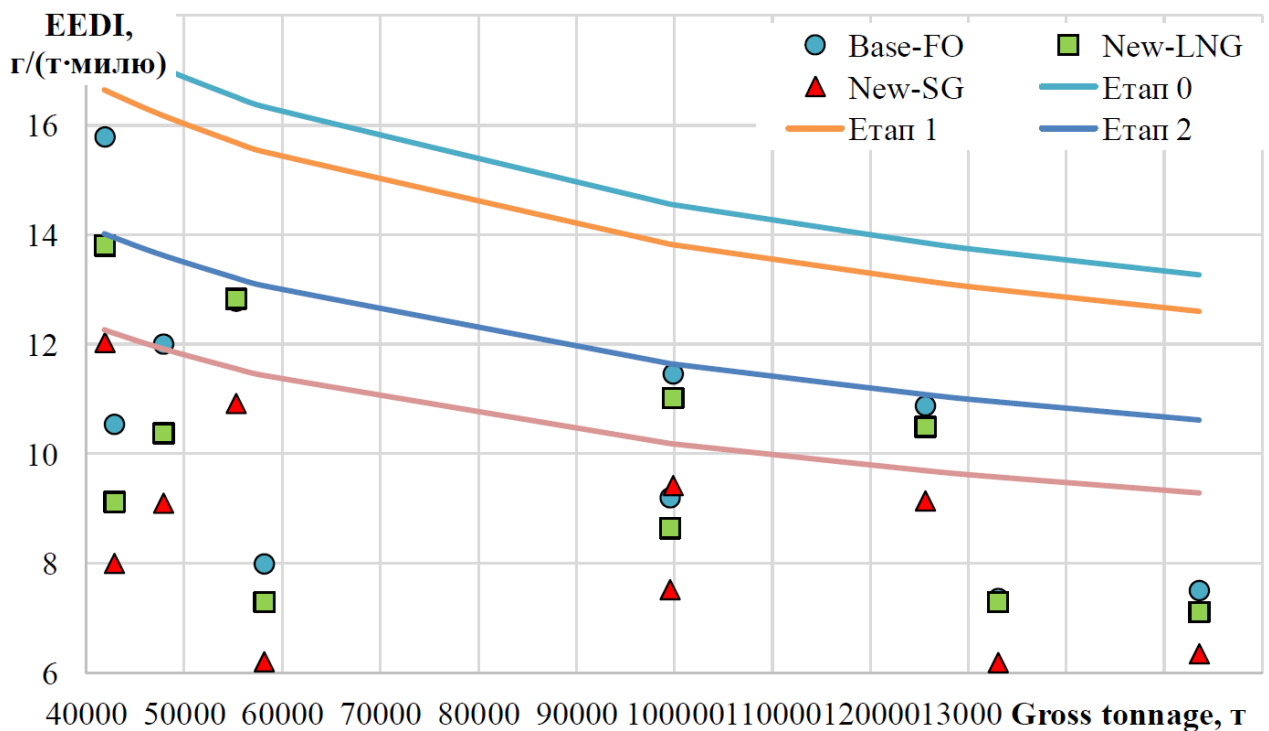


Рисунок 7.12 – Співставлення розрахункових значень індексів енергоефективності EEDI з вимогами ІМО для круїзних лайнерів

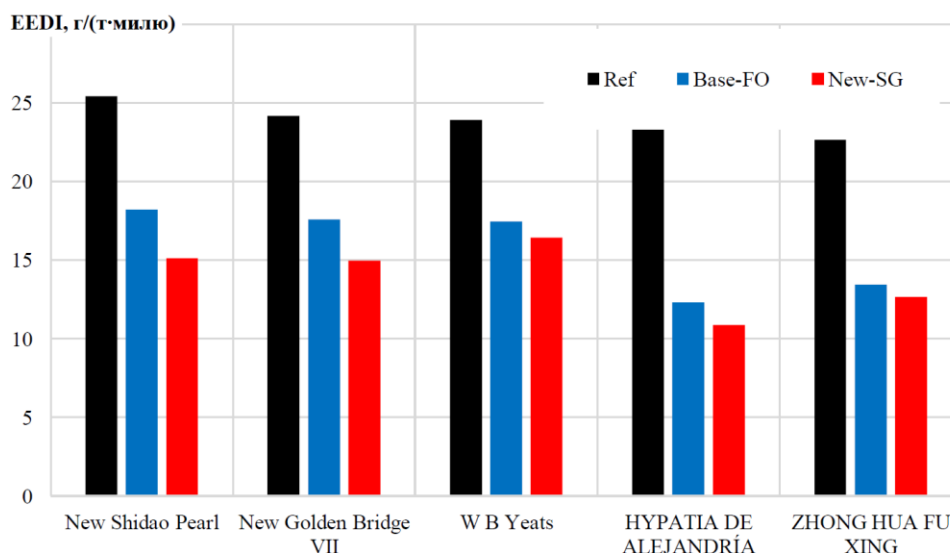


Рисунок 7.13 – Співставлення індексу енергоефективності судна EEDI для базових та альтернативних варіантів енергокомплексів суден Ro-рах при роботі на нафтовому паливі та синтез-газі

Для суден Ro-рах підвищення енергоефективності складає від 5 до 15 %.

Окремо розглянуто варіант модернізації енергокомплексу швидкісного порому Ro-рах типу FRANCISCO. Судно призначено для перевезення 950 пасажирів та 150 транспортних засобів зі швидкістю 50 вуз. [223]. Базовий енергокомплекс виконано за конфігурацією DF/GTE/M та містить два ГТД потужністю 22 МВт кожний, які працюють на водомети. Паливо – LNG.

Розрахунки за створеними математичними моделями показують, що дооснащення енергокомплексу порому FRANCISCO підсистемою термохімічної утилізації та перетворення енергії дає можливість підвищити енергоефективність на 10 %.

В процесі формування технічних пропозицій щодо застосування альтернативних енергетичних комплексів для суден Ro-Ro та Ro-рах підтверджено перспективність застосування метанолу в якості базового палива енергокомплексу з ТХУ.

Співставлення характеристик базового енергокомплексу (конфігурація SF/D2S/Dr, паливо MDO) та альтернативного енергокомплексу конфігурації (DF/GTE/El)+(DF/D4S/El)+ТХУ, якій працює на метанолі, виявило, що при

використанні альтернативного варіанту очікуваний індекс енергоефективності поліпшується на 20 %.

Зазначимо, що прийняття проектних рішень щодо використання альтернативних палив та/або альтернативних енергокомплексів потребує техніко-економічного обґрунтування.

7.3 Еколого-економічне обґрунтування доцільності використання термохімічних технологій в суднових енергетичних установках високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування

Дослідження, які виконувались за замовленням підприємств ДП Дослідно-проектний центр кораблебудування, JIANGSU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, GEORGIAN VERITAS, виявили необхідність розробки методики екологічно – економічної оцінки доцільності використання термохімічних технологій в енергетичних установках плавучих об'єктів. Підходи, які розроблені ІМО для оцінки енергоефективності транспортних суден, не можуть бути розповсюджені на об'єкти офшорної інфраструктури, тому що орієнтовані на оцінку співвідношення викидів CO₂ та транспортної роботи судна.

В якості індикатору впливу об'єкту офшорної інфраструктури на навколишнє середовище, у першу чергу для оцінки викидів CO₂, може бути застосовано поняття питомої емісії діоксиду вуглецю WTW за весь життєвий цикл палива, від видобутку до спалювання.

Цей показник складається з емісії, яка утворюється при спалюванні палива – CDE, та емісії – WTT.

Емісія WTT пов'язана з викидами CO₂ при видобуванні сировини, в процесах переробки, виробництва, транспортування та інших процесах, які передують подачі палива до двигуна. Вплив багатьох чинників (базова сировина, технологія виробництва, родовище та інше) призводить до необхідності визначення діапазону значень WTT, обмеженого мінімальними та

максимальними значеннями. З урахуванням того, що деякі альтернативні палива виробляються з відновлювальної сировини (наприклад, біоетанол) мінімальне значення цього показника може бути негативним.

Для дизельного палива MDO величина WTT варіюється від 0,284 до 1,020 кг CO₂/кг [220]. WTT метанолу коливається від –0,89 кг CO₂/кг для палива, яке виробляється з біомаси та з використанням відновлювальних джерел електроенергії, до 2,965 кг CO₂/кг при виробленні метанолу традиційним шляхом з вугілля [225–229]. WTT для LNG варіюється від 0,91 до 0,129 кг CO₂/кг, WTT для біоетанолу лежить у діапазоні від –0,352 до –0,149 кг CO₂/кг [229].

Питома емісія діоксиду вуглецю CDE залежить від енергетичної ефективності теплового двигуна або установки η , яка може бути оцінена як ККД; нижчої теплоти згоряння палива H_U , МДж/кг; вмісту вуглецю у паливі CC , кг/кг:

$$CDE = \frac{3600}{\eta \cdot H_U} \cdot CC \cdot \frac{11}{3}, \text{ (кг/кВт)}. \quad (7.1)$$

Рівняння вірно, якщо весь вуглець реагує з киснем з утворенням вуглекислого газу. Аналіз рівняння (7.1) підтверджує висновки, надані в розділі 3, згідно з якими зменшення викидів CO₂ досягається підвищенням ефективності двигуна та/або використанням палива з низьким вмістом вуглецю.

Для визначення загальної емісії діоксиду вуглецю WTW за весь життєвий цикл палива запропонована наступна формула

$$WTW = \frac{3600}{\eta \cdot H_U} \cdot \left(CC \cdot \frac{11}{3} + WTT \right), \text{ кг/(кВт·год)}. \quad (7.2)$$

Для економічної оцінки доцільності використання альтернативних видів палива та технологій перетворення енергії запропоновано наступні критерії: вартість енергії палива та вартість енергії палива на одиницю корисної потужності [230, 231].

Вартість енергії палива знаходиться як

$$EC = \frac{Fpr}{H_U}, \text{ USD/ГДж}, \quad (7.3)$$

де F_{pr} – вартість палива, USD/т; H_U – нижча теплота згоряння палива МДж/кг.

Вартість енергії палива на одиницю корисної потужності

$$ECUW = \frac{F_{pr}}{\eta \cdot H_U}, \text{ USD/ГДж}, \quad (7.4)$$

або

$$ECUW = \frac{F_{pr}}{3,6 \cdot \eta \cdot H_U}, \text{ USD/(МВт год)}. \quad (7.5)$$

У розділі 1 вказано, що одним із рішень проблеми використання попутного газу на офшорних родовищах є створення технологічних установок з переробки попутного газу в метанол. В звітах ІМО та UNCTAD метанол та метанольно-спиртові суміші розглядаються як перспективні замітники традиційних палив. На базі вказаних підходів виконано екологічно-економічне обґрунтування доцільності використання термохімічної утилізації скидної теплоти в енергетичних комплексах плавучих об'єктів нафтогазовидобування. В якості палива розглядались два варіанта: базовий – MDO та альтернативний – метанол.

Екологічно-економічне обґрунтування виконувалось стосовно енергомодуля конфігурації DF/GTR/El+TXU на базі регенеративного ГТД типу GT3200RG (схема на рис. 5.9) потужністю 3,4 МВт (детально розглянутий у розділі 5). В результаті термохімічної обробки палива шляхом утилізації теплоти відпрацьованих газів ефективність перетворення енергії палива в енергомодулі підвищена на 11,45 %. З кожного 1 кг метанолу ($H_U = 19,9$ МДж/кг) отримано 1,94 кг синтез-газу ($H_U = 11,3$ МДж/кг). Склад отриманого в результаті конверсії синтез-газу наступний (об'ємні долі): водень 58,07 %; водяна пара 19,61 %; діоксид вуглецю 19,34 %; метанол 2,95 %; оксид вуглецю 0,03 %. За рахунок термохімічної утилізації енергетична ефективність ГТГ збільшилась на 4 % та склала 42,5 %.

Розрахунок екологічних показників.

Результати розрахунку питомої емісії CO₂ при використанні традиційного (нафтового) та альтернативних палив (природний газ, біоетанол, метанол, продукти конверсії метанолу) представлено на рис. 7.14.

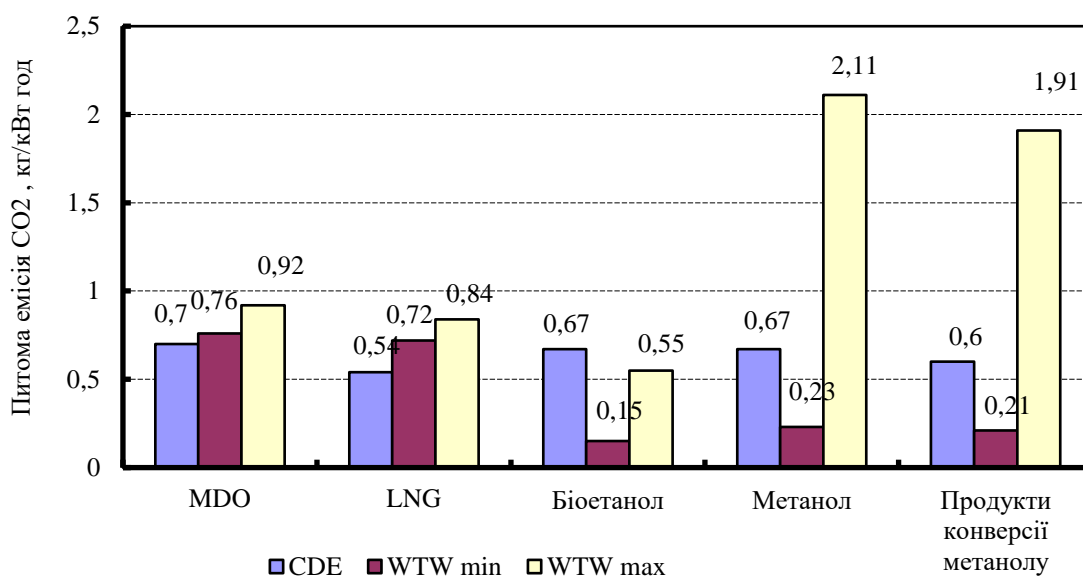


Рисунок 7.14 – Питома емісія CO₂ для різних палив

Найкращі показники характерні для біоетанолу. Використання продуктів парової конверсії метанолу забезпечує показники емісії CO₂ на рівні показників, відповідних спалюванню етанолу в ГТД.

Встановлено, що за рахунок використання ТХУ забезпечено зменшення викидів вуглекислого газу на 9,5 % порівняно з прямим спалюванням метану та на 12–13 % порівняно зі спалюванням дизельного палива.

Розрахунок економічних показників.

Для економічного аналізу використано ціни на нафтове паливо (MDO) та метанол з січня 2017 року до січня 2020 (рис. 7.15). Середні світові ціни на MDO доступні в Інтернеті на сайті Ship&bunker. Для метанолу застосовано офіційні ціни на сайті Methanex (найбільший у світі виробник метанолу).

Виконаний аналіз вартості енергії показав, що з другого півріччя 2019 року вартість енергії метанолу була нижчою порівняно з MDO (рис. 7.16). Така ж ситуація стосується вартості енергії палива на одиницю корисної потужності (рис. 7.17).

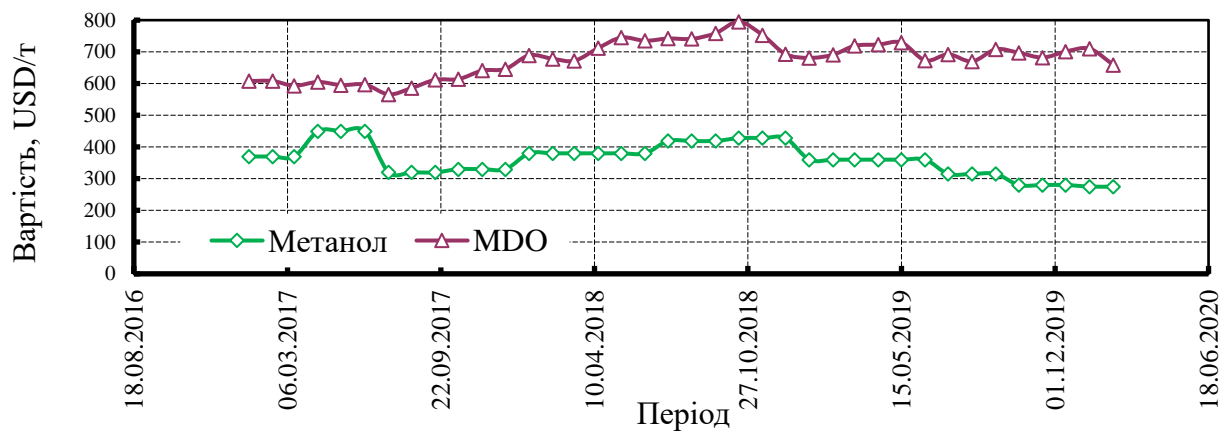


Рисунок 7.15 – Зміна вартості палив

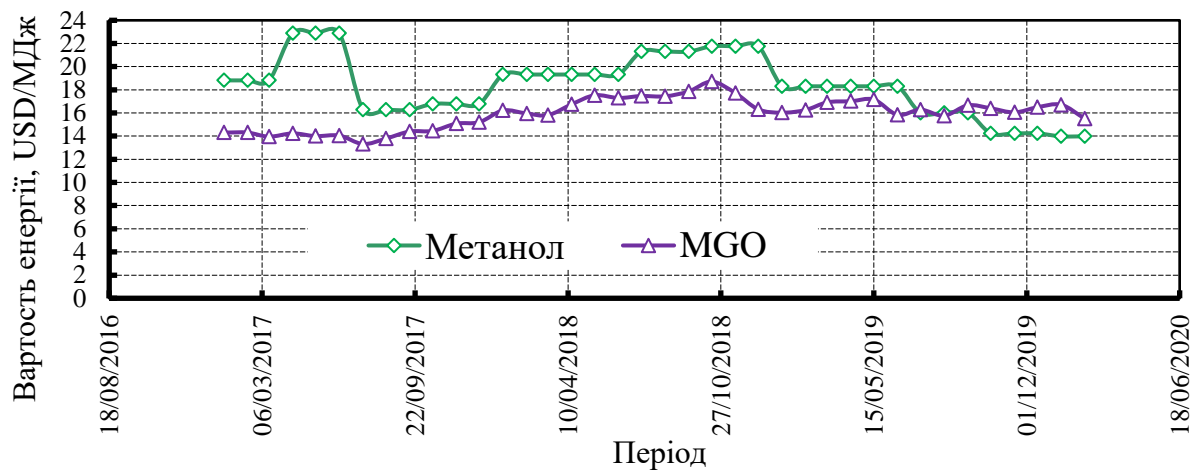


Рисунок 7.16 – Зміна вартості енергії палив

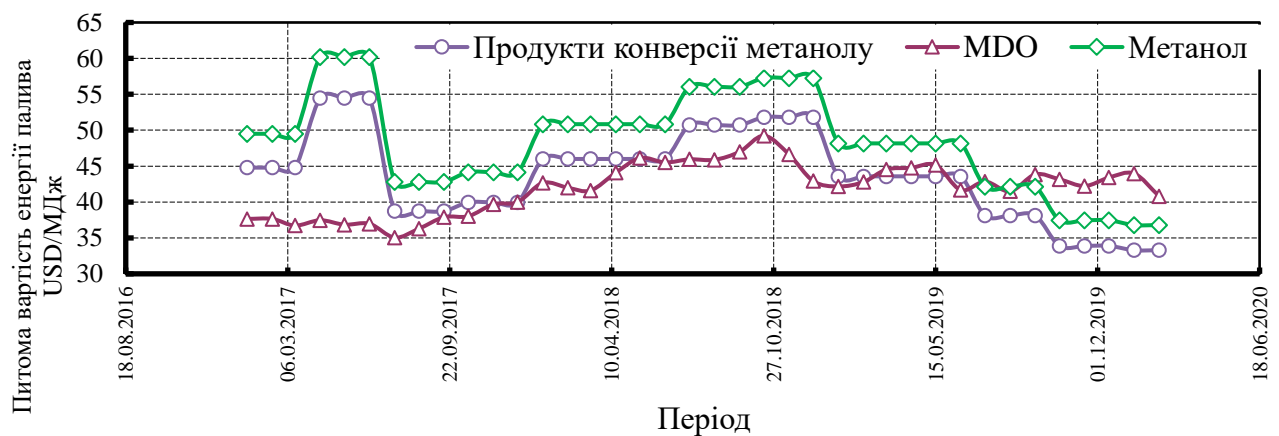


Рисунок 7.17 – Зміна вартості енергії палив на одиницю корисної потужності

Важливою економічною характеристикою рентабельності вироблення енергії є питома електрична потужність, яка приходить на грошову одиницю її вартості

$$W_m = \frac{1000 \cdot \eta \cdot H_U}{3600 \cdot F_{pr}} = \frac{\eta \cdot H_U}{3,6 \cdot F_{pr}}, \text{ кВт /USD}. \quad (7.6)$$

Результати розрахунку цього показника для ГТГ, який працює на MDO, метанолі та продуктах конверсії метанолу надано на рис. 7.18.

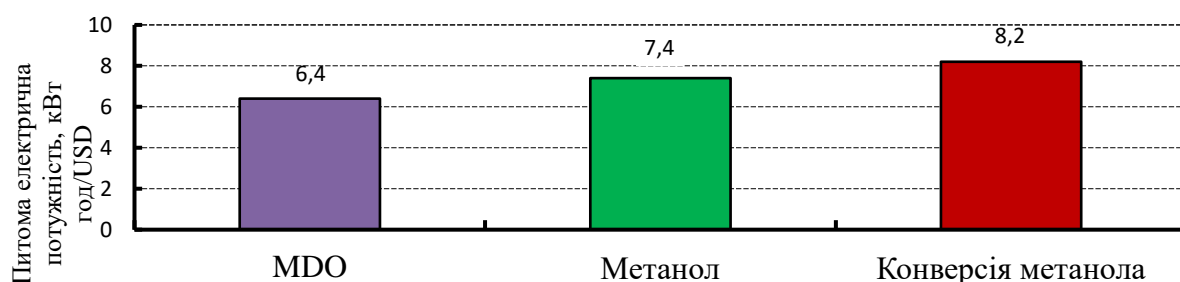


Рисунок 7.18 – Питома електрична потужність

Використання термохімічних технологій значно покращує рентабельність вироблення енергії. Питома електрична потужність, яка приходить на грошову одиницю її вартості, для запропонованої автором установки з термохімічною обробкою палива шляхом утилізації вторинних енергоресурсів на 28 % вище ніж у базовому варіанті.

Просте порівняння вартості палив та вартості енергії альтернативних та традиційних палив (див. рис. 7.15–7.16) не в повній мірі віддзеркалює всю необхідну інформацію для економічного аналізу прийнятих проєктних рішень. Згідно рекомендаціям [230, 231], необхідно оперувати «точкою рівноваги», яка враховує відношення вартості палив, та, одночасно, співвідношення величин енергій, які приходить на одиницю корисної потужності:

$$PFR_0 = \frac{F_{pr_a}}{F_{pr_c}} = \frac{H_{U_a} \cdot \eta_a}{H_{U_c} \cdot \eta_c}. \quad (7.7)$$

Застосування альтернативного палива вважається економічно доцільним, якщо фактичне співвідношення вартості палив менше ніж «точка рівноваги».

Згідно проведеному аналізу, починаючи з червня 2019 року, для ГТГ на базі регенеративного газотурбінного двигуна з термохімічною рекуперацією та з липня 2019 року, для звичайного регенеративного газотурбінного двигуна фактичні співвідношення цін метанол/(MDO) менші, ніж точка рівноваги (рис. 7.19). Тому метанол може розглядатися як конкурентна альтернатива нафтовим паливам.

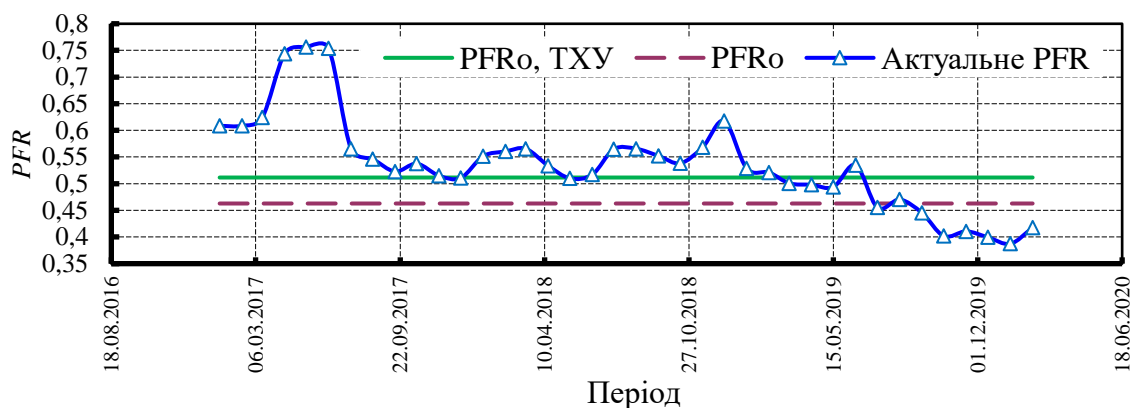


Рисунок 7.19 – Зміна співвідношення вартості палив метанол/MDO

Подальше підвищення економічної ефективності запропонованого альтернативного енергокомплексу з ТХУ пов'язано з утилізацією скидної теплоти ГТД для вироблення теплової енергії. Це перспективний шлях підвищення ефективності, тому що технологічні процеси видобутку та переробки викопних вуглеводневих енергоносіїв потребують значних витрат теплової енергії.

Теплова потужність утилізаційного котла визначається наступними основними факторами: витратою відпрацьованих газів ГТД, їх температурою та температурою газів на виході з котла. Метанол не містить сірки, що дає можливість зменшення температури на виході з котла в порівнянні з нафтовим паливом. Проаналізовано два варіанта когенераційних схем на базі (табл. 7.7):

- B1 – регенеративний ГТГ (паливо - MDO);
- B2 – регенеративний ГТГ з ТХУ (паливо - метанол).

Перший (базовий) варіант генерує на 30 % більше теплової енергії. З економічної точки зору другий (альтернативний) варіант буде кращим, якщо

різниця у витратах на пальне перевищить вартість різниці виробленої теплової енергії, тобто якщо виконується наступна умова

$$GF_1 \cdot Fpr_1 - (GF_2 \cdot Fpr_2 + GW \cdot Fw) > \xi \cdot (Q_1 - Q_2) \cdot Thpr, \quad (7.8)$$

USD,

Таблиця 7.7 – Характеристики когенераційних установок

Параметр		Тип ГТГ	
		B1	B2
Потужність ГТГ	кВт	3400	3400
Витрата відпрацьованих газів	кг/с	16,0	17,1
ККД	%	38	42
Базове паливо	—	MDO	Метанол
Питома витрата палива	г/(кВт·год)	222,9	435,8
Витрата палива	кг/год	757,9	1481,6
	кг/с	0,211	0,412
Витрата води	кг/с	0	0,69
Температура відпрацьованих газів	К	600	451
Температура за котлом	К	438	333
Теплова потужність	кВт	2626	2018

де Q_1 – теплова потужність для першого варіанту, кВт; Q_2 – теплова потужність для другого варіанту, кВт; $Thpr$ – вартість теплової енергії, USD/(кВт·год); GF_1 – годинна витрата палива для першого варіанту, кг/год; GF_2 – годинна витрата палива для другого варіанту, кг/год; GW – годинна витрата води, кг/год; Fpr_1 , Fpr_2 , Fw – вартість MDO, метанолу та води, відповідно, USD/кг; ξ – коефіцієнт навантаження.

При подальших розрахунках відносна економічна ефективність E застосування термохімічних технологій утилізації представлена в наступному вигляді

$$E = \frac{(GF_1 \cdot Fpr_1 - (GF_2 \cdot Fpr_2 + GW \cdot Fw)) - \xi \cdot (Q_1 - Q_2) \cdot Thpr}{GF_1 \cdot Fpr_1} \quad (7.9)$$

Базовий розрахунок проведено за наступних умов:

- вартість палива складає для метанолу 0,280 USD/кг, для палива MDO 0,642 USD/кг (з урахуванням цін станом на грудень 2019 року);
- вартість теплової енергії 0,05 USD/(кВт·год) [232];
- коефіцієнт навантаження 60 – 100 %.

При встановленні установки опріснення морської води на плавучому об'єкті нафтогазовидобування вартість обробленої води залежить від технологій опріснення, продуктивності установки та відстані до бази постачання. Останнє пов'язано з необхідністю транспортування обслуговуючого персоналу, витратних матеріалів, запасних частин для робіт з технічного обслуговування та експлуатації установки. При розташуванні плавучої бурової платформи на відстані 150 миль (середня відстань) від бази постачання, вартість прісної води складає біля 11,2 USD/т [233].

Згідно отриманим результатам при 70 % навантаженні відносна економічна ефективність дорівнює 5 %. У випадку вказаної вартості палив, води та виробництва теплової енергії годинний економічний ефект, у порівнянні з базовим варіантом, складає біля 23,7 USD/год. За умов цілорічної експлуатації установки в складі енергетичного обладнання офшорної платформи, час річної наробітки складає 7902 години. Розрахунок річної наробітки виконано з урахуванням рекомендацій [234] щодо планового відключення установки на технічне обслуговування, яке складає 438 годин, та можливі позапланові відключення (до 420 годин). За таких умов скорочення операційних витрат від впровадження термохімічних технологій утилізації вторинних енергоресурсів складає біля 187,5 тис. USD на рік.

7.4 Перспективи застосування наукових і практичних положень та визначення напрямів подальших досліджень

Розширення уявлень про фізико-хімічні процеси термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів, обробки палив та процесів горіння продуктів їх конверсії є науковим підґрунтям для реалізації концепції підвищення

ефективності суднових енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування.

В подальшому результати виконаних наукових досліджень пропонується використовувати при розробці вискоефективних та конкурентоздатних вітчизняних енергетичних установок на базі ГТД нового покоління (потужністю 3–32 МВт) для використання їх в якості засобів надійного, економічного та швидкого забезпечення електроенергією широкого кола об'єктів морської інфраструктури, суден різного призначення, а також стаціонарних і мобільних енергокомплексів.

Розроблені алгоритми та методики розрахунку, прикладне програмне забезпечення, схемні рішення та практичні рекомендації з використання систем термохімічної утилізації в складі газотурбінних та комбінованих установок надають можливість проектування енергокомплексів газовозів LNG, LPG, круїзних лайнерів, та інших високотехнологічних суден різного призначення.

Подальші дослідження у галузі використання термохімічних технологій в судновій енергетиці можуть бути пов'язані з застосуванням паливних елементів. Паливні елементи мають значно більшу ефективність, ніж традиційні суднові електроенергетичні установки з двигунами внутрішнього згоряння та газовими турбінами. Однак специфічні вимоги та деякі технічні проблеми обмежують застосування паливних елементів у морській техніці.

Один з перспективних типів паливних елементів для застосування в суднових умовах – це твердооксидний паливний елемент (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell) [235–246].

SOFC мають широкий спектр застосувань: від портативних джерел струму (10–300 Вт) до автономних стаціонарних електростанцій (1–10 МВт і більше). Їх сильні сторони зумовлені насамперед високою ефективністю прямого перетворення паливної хімічної енергії в електричну. У цьому випадку будь-які вуглеводні можуть використовувати як паливо, а повітря як окиснювач. Крім того, електрохімічне спалювання палива забезпечує високу екологічність процесу вироблення електроенергії. Це дозволяє реалізувати SOFC з газовою

турбіною (GT) для отримання електричної та теплової енергії в гібридних циклах (SOFC-GT). Таки гібридні цикли будуть конкурентоспроможними для традиційних гібридних циклів, що складаються з газової турбіни та утилізаційного парогенератора, що відновлює тепло, оскільки ефективність всієї системи може досягати 70 % і більше [237–241].

Перспективною можна вважати схему суднової електроенергетичної установки з використанням стеків твердооксидних паливних елементів в комплексі з регенеративним ГТД, який працює з перерозширенням – рис. 7.20. В ході виконання спільного проєкту з JIANGSU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY (КНР) та з метою перевірки можливостей перспективного використання термохімічних технологій в судновій енергетиці теоретичним шляхом досліджено характеристики суднової електроенергетичної установки потужністю 500 кВт зі стеками твердооксидних паливних елементів в комплексі з регенеративним ГТД, який працює з перерозширенням. В якості базового елемента схеми розглянуто стек SOFC трубчастої конструкції фірми Siemens–Westinghouse [242]. В якості базового ГТД розглянуто регенеративні ГТД типу Capstone C60 і C200 потужністю 65-200 кВт. В розрахунках робочих процесів приймалися: ККД компресора 0,81, ексгаустеру 0,82; турбіни 0,90 відповідно.

Для комплексу SOFC-GT розглянуто складну схему газотурбінного агрегату (ГТА), в якій реалізовано цикл з регенерацією теплоти газів після турбіни, що працює з перерозширенням. Така схема ГТА надає можливість знизити до мінімальних значень величину тиску в корпусі стеку SOFC (не більш 0,18-0,20 МПа) і значно підвищити ефективність паливних елементів.

Згідно з підходами, які сформовані в розділі 2, математична модель комплексу SOFC-GT складається з двох складових: моделі стеку SOFC та регенеративного ГТД з перерозширенням. В табл. 7.8 узагальнено допущення, які зроблені при розробці моделі паливного елемента.

температури газу перед турбіною T_{3T} таких параметрів як: температура перегрітого повітря на вході в стек SOFC на номінальному режимі роботи – T_{1s} , величина коефіцієнту регенерації – r та ступеню підвищення тиску повітря компресору – π_c .

Температура газу на виході з КЗ визначається як:

$$T_{2Comb} = \frac{g_{Fc} \left[H_u \eta_{Co} + c_{p\alpha=1} (L_0^l + 1) \cdot 293 - c_{p2A} L_0^l \cdot 293 \right] + c_{pSA} (T_s - 293) + c_{p2A} \cdot 293}{g_{Fc} \left[c_{p\alpha=1} \cdot (L_0^l + 1) - c_{p2A} L_0^l \right] + c_{p2A}}, \quad (7.10)$$

де: g_{Fc} – відносна витрата повітря через КЗ; T_s – робоча температура стеку; L_0^l – стехіометрична кількість збідненого киснем повітря на виході з катоду стеку; H_u – нижча теплотворна здатність суміші газів на виході з аноду стеку; η_{Co} – коефіцієнт повноти згоряння КЗ; $c_{p\alpha=1}$ – середня масова ізобарна теплоємність стехіометричних продуктів спалювання для температури T_{2Comb} процесу в КЗ; c_{pSA} , c_{p2A} – середні масові ізобарні теплоємності повітря для температур T_s и T_{2Comb} процесу в КЗ.

Температура газу на вході в турбіну ГТА визначається як:

$$T_{3T} = T_{2Comb} - \frac{c_{p3A} \left[T_{1s} - T_2 - r \frac{c_{p4G}}{c_{p4A}} (T_4 - T_2) \right]}{(1 + g_{Fc}) c_{p3G}}, \quad (7.11)$$

де: c_{p3A} , c_{p3G} – середні масові ізобарні теплоємності повітря та продуктів спалювання для процесів теплообміну в перегрівнику повітря; c_{p4A} , c_{p4G} – середні масові ізобарні теплоємності повітря та и продуктів спалювання для процесів теплообміну в регенераторі; T_2 – температура повітря за компресором ГТА; T_4 – температура газу за турбіною ГТА.

Розрахункові потужності компресору, турбіни та ексгаустеру на один стек складають, відповідно:

$$N_C = G_C \cdot c_{p_{1A}} \cdot T_A \cdot \left(\pi_c^{\frac{k_{1a}-1}{k_{1a}}} - 1 \right) / \eta_C; \quad (7.12)$$

$$N_T = G_C \cdot (1 + g_{Fc} \alpha_C) \cdot c_{p_{4G}} \cdot T_{3T} \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi_T^{\frac{k_{3G}-1}{k_{3G}}}} \right) \cdot \eta_T; \quad (7.13)$$

$$N_E = G_C \cdot (1 + g_{Fc} \alpha_C) \cdot c_{p_{4A}} \cdot T_{1E} \cdot \left(\pi_E^{\frac{k_{2a}-1}{k_{2a}}} - 1 \right) / \eta_E, \quad (7.14)$$

де: π_C, π_E, π_T – відповідно ступені підвищення тиску в компресорі та ексгаустері, а також ступінь пониження тиску в турбіні; η_C, η_E, η_T – відповідно адіабатичні ККД компресора, ексгаустеру та турбіни; G_C – витрата повітря через компресор; T_A – температура повітря перед компресором; T_{1E} – температура газу перед ексгаустером; k_{1a}, k_{2a}, k_{3G} – відповідно показники ізоентропи процесів для компресора ексгаустеру та турбіни відповідно; $c_{p_{1A}}, c_{p_{4A}}, c_{p_{4G}}$ – відповідно середні масові ізобарні теплоємності повітря та продуктів спалювання для процесів теплообміну в компресорі, ексгаустері та турбіні відповідно.

Електрична потужність газотурбінної частини:

$$N_{GT} = (N_T - N_C - N_E) \eta_r \eta_g \eta_i, \quad (7.15)$$

де: η_r, η_g, η_i – відповідно редуктора, генератора та інвертора.

Електрична потужність комплексу SOFC-GT:

$$N_\Sigma = N_{SOFC} + N_{GT}, \quad (7.16)$$

де N_{SOFC} – електрична потужність стеку SOFC.

Електричний ККД комплексу SOFC-GT:

$$\eta_\Sigma = \frac{3600 N_\Sigma}{G_{fh} \cdot H_u}, \quad (7.17)$$

де G_{fh} – годинна витрата палива на вході в стек SOFC.

На рис. 7.21 надано результати дослідження ефективного ККД гібридної схеми від ступеня підвищення тиску повітря в компресорі для ряду значень

ступеня підвищення тиску газу в ексгаустері. Зміна температури газу перед турбіною ГТД представлено на рис. 7.22.

Рисунок 7.21 –
Залежності
ефективного
ККД гібридної
схеми

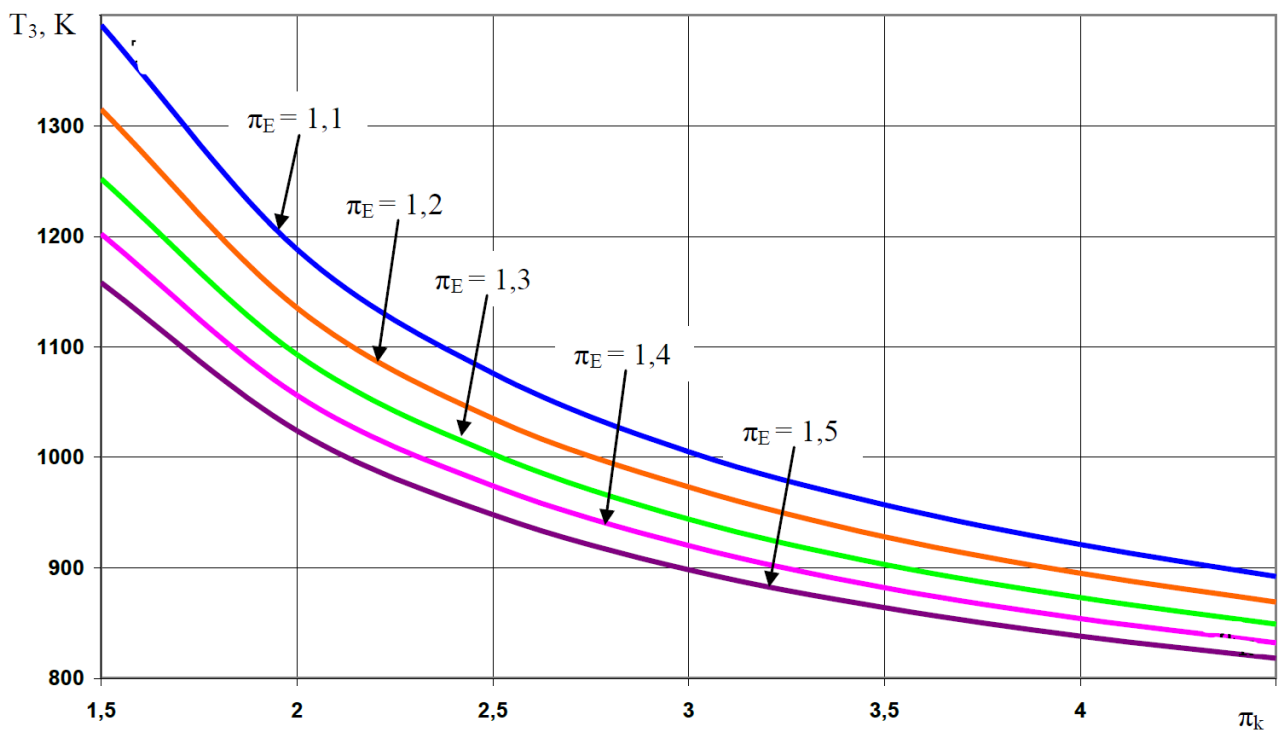
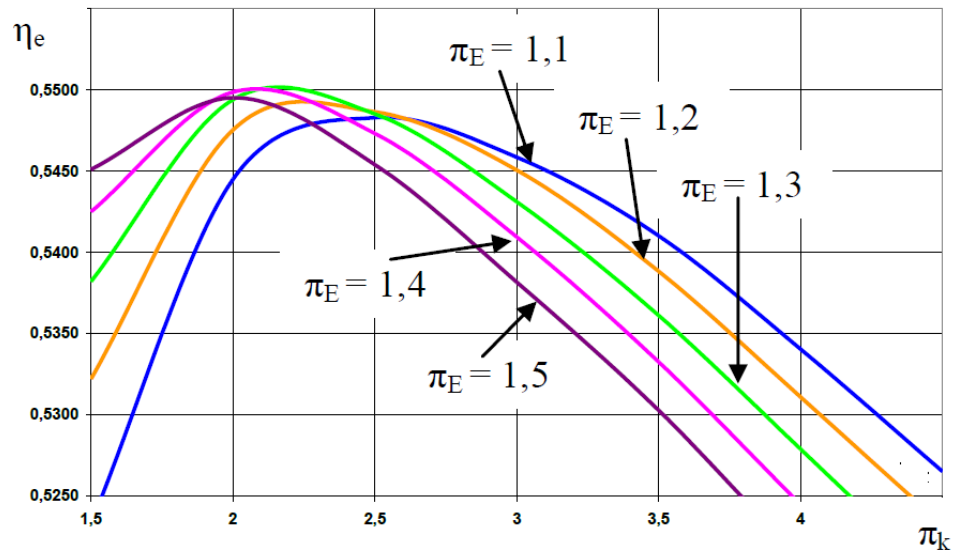


Рисунок 7.22 –Зміни температури газу перед турбіною ГТД
в гібридній схемі

Згідно з результатами математичного моделювання за умов використання серійного обладнання та існуючих технологій для серійних мікротурбін потужністю 60-200 кВт можливо отримання ефективного ККД гібридної схеми біля 55 % при оптимальному значенні ступеня підвищення тиску повітря в

компресорі ГТД 2,0-2,2 та ступеня підвищення тиску газу в ексгаустері 1,3-1,4. Використання схеми SOFC-GT забезпечує приріст ККД вироблення електроенергії приблизно на 19 %. Температура газу перед турбіною ГТД складає 1050-1090 К.

На рис. 7.23 представлено зміни сумарної потужності вироблення електроенергії гібридною схемою в залежності від ступеня підвищення тиску повітря в компресорі ГТД для ряду значень ступеня підвищення тиску газу в ексгаустері.

Для вищевказаних оптимальних параметрів схеми можливо отримання додаткової потужності в ГТД 27,5...27,7 кВт на один стек.

Отриманні результати надають можливість створення суднової електроенергетичної установки потужністю 500 кВт з використанням запропонованої гібридної схеми вироблення електроенергії використанням зі стеками твердооксидних паливних елементів в комплексі з регенеративним ГТД, який працює з перерозширенням.

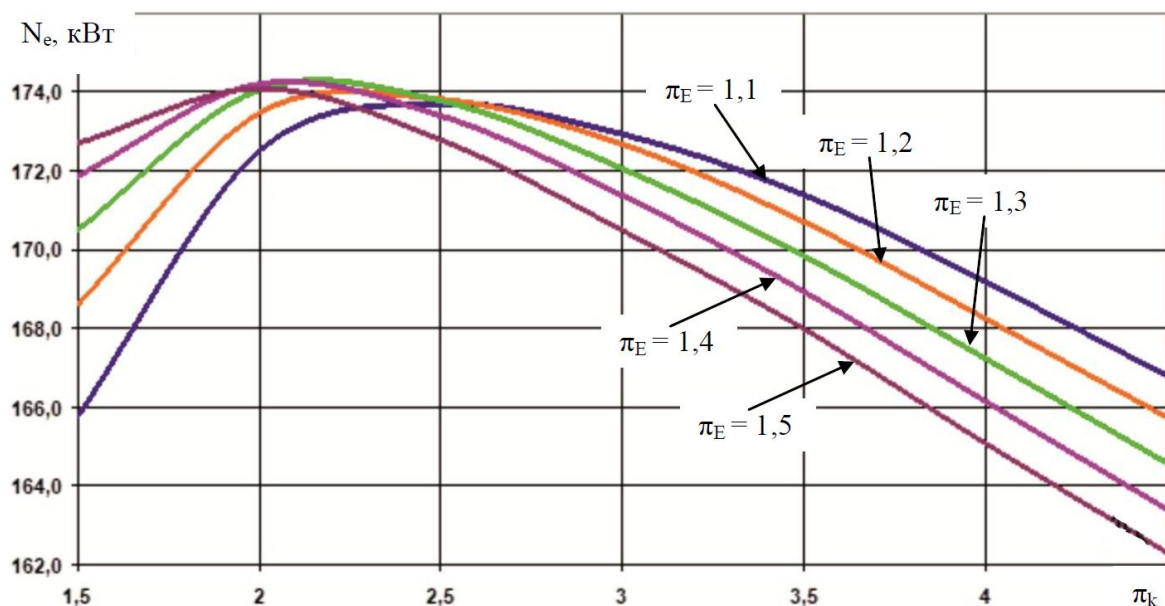


Рисунок 7.23 – Залежності зміни сумарної потужності вироблення електроенергії від параметрів ГТД в гібридній схемі

Основні параметри теплової схеми гібридної суднової електростанції потужністю 500 кВт в умовах ISO наведено в табл. 7.9.

Таблиця 7.9 – Параметри теплової схеми SOFC-GT потужністю 500 кВт

Параметр	Значення
1. Кількість стеків SOFC Siemens – Westinghouse	3
2. Температура зовнішнього повітря, К	288
3. Витрата повітря через компресор ГТД, кг/с	0,9084
4. Ступінь підвищення тиску в компресора ГТД	1,95
5. Температура повітря на вході в регенератор, К	363
6. Внутрішній ККД компресору, %	81
7. Температура повітря на виході з регенератора, К	800
8. Температура повітря на виході з перегрівача, К	1053
9. Температура повітря на виході зі стеку, К	1183
10. Тиск повітря на виході зі стеку, МПа	0,1849
11. Витрата повітря на виході з батареї стеків, кг/с	0,8526
12. Витрата природного газу, кг/с	0,0216
13. Витрата суміші на виході з батареї стеків, кг/с	0,0786
14. Температура суміші на виході з батареї стеків, К	1183
15. Температура газу на виході з камери згоряння, К	1302
16. Температура газу на вході в турбіну, К	1068
17. Витрата газу на вході в турбіну, кг/с	0,9128
18. Ступінь пониження тиску в турбіні ГТД	2,38
19. Внутрішній ККД турбіни, %	90
20. Температура газу на виході з турбіни, К	878
21. Температура газу на виході з регенератора, К	448
22. Ступінь підвищення тиску в ексгаустері ГТД	1,4
23. Внутрішній ККД ексгаустера, %	82
24. Температура газу на вході в ексгаустер, К	294
25. Температура газу на виході з ексгаустера, К	330
26. Потужність ГТД, кВт	83,19
27. Потужність батареї стеків, кВт	440
28. Загальна потужність електростанції, кВт	523
29. Ефективний ККД електростанції, %	55

За результатами теоретичного дослідження характеристик суднової електроенергетичної установки з використанням стеків твердооксидних

паливних елементів в комплексі з регенеративним ГТД, який працює з перерозширенням виявлено наступне:

- запропонована гібридна схема надає можливість знизити до мінімальних значень тиск в корпусі стеку (не більше 0,18–0,20 МПа);
- застосування запропонованої схеми дає приріст ККД вироблення електроенергії на 19%;
- оптимальні параметри турбомашин гібридної установки SOFC-GT- ступень підвищення тиску повітря в компресорі 2,0-2,2, ступінь підвищення тиску газу в ексгаустері 1,3...1,4, рівень температур газу перед турбіною 1050–1090 К.

7.5 Ефективність результатів впровадження

Результати дисертаційного дослідження впроваджено на ряді промислових підприємств та вищих навчальних закладів.

1. Для ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування» державного концерну «УКРОБОРОНПРОМ» виконано дослідження ефективності використання термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів енергетичної установки морської платформи. Практична реалізація методів розрахунку процесів перетворення енергії в системах обробки вуглеводневого палива та процесів в камерах згоряння, які працюють на продуктах конверсії, надали можливість порівняння ефективності різних схемних рішень газотурбінної енергетичної установки потужністю 10-15 МВт з термохімічною обробкою попутного нафтового газу. Визначено склад енергетичного комплексу з термохімічною утилізацією, обрано основне устаткування, розроблено рекомендації щодо вибору параметрів підсистеми обробки палива. Виявлено, що при базових параметрах ГТД ККД установки лежить в діапазоні 46-50 %.

2. Згідно з актом № 82 від 23.07.2020 про впровадження результатів дисертаційної роботи підприємством Херсонська верф «Smart Meritime Group» при підготовці технічної документації з модернізації енергетичного обладнання

використано рекомендації щодо параметрів системи термохімічної обробки палива та адаптування термохімічних технологій утилізації теплоти двигунів до існуючого енергетичного обладнання широкого спектру призначення.

3. За замовленням підприємства «Сі-Джоб Миколаїв» виконано дослідження параметрів та характеристик перспективних схем суднових енергетичних установок для 38 варіантів високотехнологічних суден сучасної побудови (2013 – 2019 рр.): 15 проєктів газовозів LNG, 8 проєктів газовозів LPG, 10 проєктів круїзних лайнерів; 5 проєктів суден Ro-рах. Встановлено, що застосування альтернативних енергокомплексів з термохімічними системами утилізації вторинних енергоресурсів забезпечує суттєве підвищення енергоефективності та зменшення у 1,4-1,5 разів викидів CO₂ при експлуатації енергетичних установок. Згідно акту впровадження (№29/09 від 29.09.2020) математичні моделі, рекомендації та методики розрахунку впроваджено підприємством при виконанні дослідно-конструкторських робіт, пов'язаних з підвищенням ефективності використання традиційних та альтернативних видів палива та зменшенням впливу енергетичного обладнання на навколишнє середовище.

4. Від підприємства ZALIV SHIP DESIGN отримано акт впровадження результатів дисертаційної роботи (№ 15/5 від 31.07.2020) при виконанні проєктних розробок концептуальних суден з високоефективними та низькоемісійними енергетичними установками. За результатами проведених досліджень доведено, що застосування альтернативних енергокомплексів з термохімічною технологією утилізації вторинних енергоресурсів забезпечує збільшення енергоефективності круїзних лайнерів на 15-25 % відносно лайнерів з енергетичними установками, які працюють на нафтових паливах, та на 10-15 % відносно варіантів з установками, які працюють на газоподібному паливі (LNG).

5. Отримано акт про використання результатів роботи в ДП «ПКБ ЧОРНОМОРСУДНОПРОЄКТ». На базі розроблених в дисертаційній роботі методів: розрахунку процесів перетворення енергії в системах обробки вуглеводневого палива, розрахунку процесів в камерах згоряння, які працюють

на продуктах конверсії, розрахунку процесів перетворення енергії в металогідридних утилізаційних установках проаналізовано ефективність перспективних схем та параметрів інноваційних суднових енергетичних установок для широкого кола високотехнологічних суден. Застосування отриманих науково-прикладних результатів та розроблених в дисертаційній роботі математичних моделей при формуванні технічних пропозицій, виконанні передпроектних розробок і проектних робіт дозволило забезпечити вибір і обґрунтування принципів схем енергетичних комплексів, визначити раціональні параметри обладнання.

6. Отримано акт впровадження результатів роботи в «Jiangsu University of Science and Technology» (КНР), відповідно до контракту № M/107-2019. Результати роботи впроваджено при проектуванні та виготовленні перспективного енергетичного обладнання гібридних установок морського виконання з використанням стеків твердооксидних паливних елементів в комплексі з регенеративним ГТД, який працює з перерозширенням.

7. Результати дисертаційної роботи використано при проведенні досліджень характеристик газотурбінних енергетичних установок морського виконання підприємством «Georgian Veritas» LTD (Грузія).

8. За замовленням ТОВ «Енерготехнологія» виконано дослідження ефективності використання термохімічної обробки вуглеводневих палив на об'єктах нафтогазовидобування. За результатами дослідження розроблено схему блоку термохімічної обробки попутного газу з окремими термохімічними реакторами високого та низького тиску, розроблено проектну специфікацію блоку термохімічної обробки для енергетичного модуля потужністю 14,1 МВт.

9. Наукові та прикладні результати дослідження використовуються в навчальному процесі при підготовці здобувачів вищої освіти ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт» в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова (м. Миколаїв), ступенів «Бакалавр» та «Магістр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в Кременчуцькому національному

університеті імені Михайла Остроградського (м. Кременчук), ступенів «Бакалавр» та «Магістр» за спеціальністю 144 «Теплоенергетика» в Вінницькому національному технічному університеті (м. Вінниця), ступенів «Бакалавр» та «Магістр» за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт» в Національному університеті «Одеська Морська Академія» (м. Одеса) та Одеському національному морському університеті (м. Одеса). Впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджується відповідними актами.

Висновки за сьомим розділом

1. Використання розроблених математичних моделей, висновків і рекомендацій, отриманих в дисертації, надали можливість на етапі концептуального проєктування визначити перспективні схемні рішення суднових енергетичних установок з термохімічними системами утилізації вторинних енергоресурсів для високотехнологічних суден. За результатами проведених досліджень доведено, що застосування запропонованих енергокомплексів забезпечує поліпшення індексу енергоефективності:

- для газовозів LNG з єдиною електроенергетичною установкою на 25–40 %;
- для газовозів LNG з малообертовими дизельними двигунами на 4–6 %;
- для газовозів LPG на 30–42 % в порівнянні з енергокомплексами, які працюють на нафтових паливах, та на 22–24 % в порівнянні з енергокомплексами, які працюють на LPG;
- для круїзних суден на 15–25 % відносно енергокомплексів, які працюють на нафтових паливах, та на 10–15 % відносно енергокомплексів, які працюють на LNG;
- для суден Ro-рах на 5–15 %.

2. За замовленням проєктних організацій розроблено методики розрахунку, які обґрунтовують доцільність використання термохімічних технологій в енергетичних установках морських об'єктів нафтогазовидобування та містять:

- методику визначення викидів вуглекислого газу, що враховує ефективність перетворення енергії палива в двигунах, властивості палива та вплив процесів, які притаманні життєвому циклу палива;

- методику економічного аналізу прийняття проєктних рішень, яка основана на порівнянні отриманого результату з «точкою рівноваги», що враховує співвідношення вартості палив та відношення величин енергій, які приходяться на одиницю корисної потужності.

3. Для когенераційної установки офшорної платформи в умовах цілорічної експлуатації розрахунком підтверджено економічний ефект від впровадження термохімічних технологій утилізації вторинних енергоресурсів.

4. Аналіз шляхів подальшого використання термохімічних технологій в судновій енергетиці встановив перспективність установок з паливними елементами, а саме судових електроенергетичних установок, що складаються зі стеків твердооксидних паливних елементів та регенеративного ГТД з перерозширенням.

5. Потребують подальших досліджень питання раціональної організації процесів перемішування вуглеводневого газоподібного палива та пари при проведенні термохімічної обробки палива в умовах, які відповідають параметрам робочих процесів судових енергетичних установок.

6. Результати дисертаційного дослідження використано при розробці проєктів модернізації судових енергетичних установок в ДП «Дослідно-проєктний центр кораблебудування» державного концерну «Укроборонпром», «Zaliv Ship Design», «Сі-Джоб Миколаїв» та ДП «ПКБ Чорноморсуднопроєкт», м. Миколаїв; Херсонській верфі «Smart Maritime Group», м. Херсон; ТОВ «Енерготехнологія», Миколаївська обл.; «Jiangsu University of Science and Technology», КНР; «Georgian Veritas» LTD, Грузія, а також в навчальному процесі при підготовці здобувачів вищої освіти в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв; Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського; Вінницькому

національному технічному університеті; Національному університеті «Одеська Морська Академія» та Одеському національному морському університеті.

Основні результати даного розділу опубліковані в роботах [57,63,243].

Відомості про праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації надані в переліку джерел посилання [244–295].

ВИСНОВКИ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

1. За результатами досліджень розроблено концепцію підвищення ефективності суднових енергетичних установок високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування, яка базується на технологіях термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів теплових двигунів енергетичних установок.

2. Отримано нові закономірності, які враховують комплексний вплив температури, тиску та відношення водяна пара/базове паливо на запропонований критерій оцінки ефективності процесів термохімічної обробки палива – коефіцієнт збільшення теплоти згоряння базового палива. Закономірності представлено у вигляді регресійних залежностей для розрахунку максимально досяжного коефіцієнта збільшення теплоти згоряння в межах заданих діапазонів температури та тиску з урахуванням обґрунтованих раціональних відношень водяна пара/базове паливо.

3. Виявлено вплив обмежень, які пов'язані з необхідністю узгодження параметрів робочих процесів термохімічної обробки палива та теплових двигунів енергетичних установок. Встановлено, що при проведенні процесу термохімічної обробки палив при тиску, що відповідає тиску підведення палива до двигуна, ефективність процесу зніжується до 50–60 % у порівнянні з термохімічною обробкою при атмосферному тиску. Витрати механічної енергії при термохімічній обробці палива та підведенні отриманих продуктів до двигуна залежать від компонентного складу палива, параметрів термохімічної обробки та особливостей теплових двигунів.

4. На підставі отриманих регресійних залежностей досліджено показники ефективності термохімічної обробки природного та попутного газів, метанолу, етанолу для діапазонів температур і тисків, які відповідають параметрам робочих процесів теплових двигунів суднових енергетичних установок:

- для діапазону середньомасових температур відпрацьованих газів суднових газотурбінних двигунів 700–820 К максимальне досяжне значення коефіцієнта збільшення теплоти згоряння метанолу та етанолу дорівнює 18–

22 %, для природного газу, попутного газу та їх головних складових максимальний досяжний приріст 8–12 %;

– для діапазону середньомасових температур відпрацьованих газів суднових середньобертових дизельних двигунів 620–700 К максимально досягне значення коефіцієнта збільшення теплоти згоряння метанолу та етанолу не перевищує 20–22 та 15–16 % відповідно;

- температурний потенціал скидної теплоти суднових малообертових дизельних двигунів не перевищує 523 К та недостатній для термохімічної обробки палива, але забезпечує ефективні перетворення енергії в металогідридних утилізаційних установках.

5. Вдосконалено багаторівневу класифікацію схем енергетичних установках високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування, яка відрізняється комплексним описом складу та головних характеристик установок, що надало можливість оцінювати ефективність використання традиційних та запропонованих нових схемних рішень енергетичних установок.

6. Встановлено, що утилізація вторинних енергоресурсів двигунів газотурбінних судових енергетичних установок шляхом термохімічної обробки вуглеводневих та спиртових палив забезпечує збільшення ККД установки до 4 % відносно контактних газо-паротурбінних установок.

7. Доведено, що використання термохімічної обробки палива шляхом утилізації теплоти відпрацьованих газів ГТД окремо для газотурбінного двигуна та окремо для дизельних двигунів при тисках, які відповідають тискам підведення палива відповідно до газотурбінного двигуна та дизельних двигунів, забезпечує підвищення ККД комбінованої дизель-газотурбінної енергетичної установки до 4 %. Запропоновані нові схемні рішення енергетичних установок високотехнологічних суден з термохімічною обробкою палива забезпечують поліпшення індексу енергоефективності EEDI: для газовозів LNG та LPG на 4-42 %; для круїзних суден та суден Ro-рах на 5-25 % .

8. Встановлено можливість стабілізації компонентного складу синтез-газу, який отримано термохімічною обробкою попутного газу за рахунок утилізації теплоти вихлопних газів газотурбінної установки суден FPSO, незалежно від вмісту метану в ньому.

9. Розроблено тривимірну математичну модель континуального типу камери згоряння ГТД, яка враховує основні фізико-хімічні процеси, що мають місце при горінні продуктів термохімічної конверсії вуглеводневих та спиртових палив, і визначаються як турбулентним сумішоутворенням, так і кінетикою хімічного реагування.

10. Проведені дослідження теплових і емісійних характеристик камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт довели ефективність принципу попереднього часткового сумішоутворення продуктів термохімічної обробки попутного газу з повітрям в каналах осерадіальних завихрювачів та стабільність процесу горіння з низькими викидами токсичних компонентів NO_x і CO , що відповідають сучасним європейським стандартам.

11. Подальший розвиток термохімічних технологій в суднових енергетичних установках можливий шляхом їх використання в системах SOFC-GT (твердооксидні паливні елементи–газова турбіна), де турбінний модуль представлено регенеративним ГТД з перерозширенням.

12. Розроблено технічні рішення, принципова новизна яких підтверджена патентами на винаходи та патентами на корисні моделі:

- непрямий спосіб вимірювання нижчої теплотворної здатності продуктів парової конверсії та пристрій для його здійснення (конструктивні рішення захищено патентом України на винахід № 114698);

- схема регенеративної газотурбінної установки з проміжним теплоносієм (конструктивні рішення захищено патентом України на винахід № 93458);

- схема регенеративної газотурбінної установки з системою термохімічної обробки палива шляхом утилізації теплоти відпрацьованих газів (конструктивні рішення захищено патентом України на винахід № 114166);

- конструктивні виконання газотурбінної камери згоряння з попереднім частковим перемішуванням палива и окиснювача та камери згоряння, що працює за технологією RQL (конструктивні рішення захищено патентами України на корисну модель № 106386 та № 93619);

- конструктивне виконання гібридної енергоустановки з використанням стеків твердооксидних паливних елементів в комплексі з регенеративним ГТД з перерозширенням (конструктивні рішення захищено патентом України на корисну модель № 143277).

13. Економіко-екологічна оцінка ефективності термохімічної утилізації теплоти вихлопних газів газотурбогенератора потужністю 3,4 МВт когенераційної установки морської бурової платформи виявила зменшення річних операційних витрат на 187,5 тис. USD (ціни станом на грудень 2019 р.).

14. Результати дисертаційного дослідження впроваджено: при розробці проекту енергетичного комплексу потужністю 10–15 МВт з термохімічною обробкою попутного нафтового газу для морської платформи (ДП «Дослідно-проектний центр кораблебудування» державного концерну «Укроборонпром», м. Миколаїв); при розробці концептуальних проєктів газовозів LNG, LPG, круїзних лайнерів, суден Ro-рах з низькоемісійними енергетичними установками («Zaliv Ship Design», «Сі-Джоб Миколаїв» та ДП «ПКБ Чорноморсуднопроект», м. Миколаїв), в технічній документації з модернізації енергетичного обладнання та питань адаптування термохімічних технологій утилізації до існуючого енергетичного обладнання (Херсонська верф «Smart Meritime Group», м. Херсон, ТОВ «Енерготехнологія», Миколаївська обл.); при проведенні досліджень характеристик суднових гібридних енергетичних установок з використанням технології SOFC-GT («Jiangsu University of Science and Technology», КНР); при проведенні досліджень характеристик газотурбінних енергетичних установок морського виконання («Georgian Veritas» LTD, Грузія), а також в навчальному процесі при підготовці здобувачів вищої освіти в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, в Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського, в

Вінницькому національному технічному університеті, в Національному університеті «Одеська Морська Академія», в Одеському національному морському університеті. Впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджується відповідними актами.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. International Energy Outlook 2013. – Available at : [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf).
2. International Energy Outlook 2017. – Available at : [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2017).pdf).
3. International Energy Outlook 2019. – Available at : [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2019\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2019).pdf).
4. BP Energy Outlook 2035. – Available at : <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2015.pdf>.
5. BP Energy Outlook 2019 edition. – Available at : <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf> (accessed 01.04.2019).
6. Braginsky, O. B. Crude oil prices: retrospective, forecast and influence on the economy / O. B. Braginsky // Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D. I. Mendeleeva). – 2008. – Vol. 52, № 6.
7. WOR 3 (2014): Marine Resources – Opportunities and Risks. – Available at : <https://worldoceanreview.com/en/wor-3>.
8. Organisation for Economic Cooperation and Development: OFFSHORE VESSEL, MOBILE OFFSHORE DRILLING UNIT & FLOATING PRODUCTION UNIT MARKET REVIEW. – 2014. – Retrieved from : [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=c/wp6\(2014\)13/final&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=c/wp6(2014)13/final&doclanguage=en).
9. IMO Train the Trainer (TTT) Course on Energy Efficient Ship Operation. Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines. – Available at : <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollutio>

n/M2%20EE%20regulations%20and%20guidelines%20final.pdf. – 01.06.2019.

10. UNCTAD/RMT/2017. – Available at : https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2017_en.pdf. – 01.06.2019.

11. UNCTAD/RMT/2018. – Available at : https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2018_en.pdf. – 01.06.2019.

12. Number of ships in the world merchant fleet as of January 1, 2018, by type. – Available at : <https://www.statista.com/statistics/264024/number-of-merchant-ships-worldwide-by-type>. – 01.06.2019.

13. Bazari, Z. Ship energy performance benchmarking/rating: methodology and application / Z. Bazari // Journal of Marine Engineering & Technology. – 2007. – Vol. 6, № 1. – P. 11–18. DOI: 10.1080/20464177.2007.11020197.

14. Global Marine Technology Trends 2030. Available at : <https://eprints.soton.ac.uk/388628/1/GMTT2030.pdf>. – 01.06.2019.

15. Offshore Magazine: OTC 2018: FPSO market recovery under way, says EMA report. – 2018. – Retrieved from : <https://www.offshore-mag.com/production/article/16804111/otc-2018-fpso-market-recovery-under-way-says-ema-report>.

16. Offshore Technology: Report: 55 FPSOs to start operations by 2022. – 2018. – Retrieved from : <https://www.offshore-technology.com/news/report-55-fpsos-start-operations-2022>.

17. Spe. Pioneer Libra FPSO. – 2017. – Retrieved from : <https://www.spe.org/en/jpt/jpt-article-detail/?art=2946>.

18. OCYAN: FPSO Pioneiro de Libra. – 2017. – Retrieved from : <http://www.ocyansa.com/en/fleet/fpso-pioneiro-de-libra>.

19. Karabetsou, C. LNG Changes in the Context of the Expanding Market of Natural Gas / C. Karabetsou, E. Tzannatos // European Research Studies Journal. – 2003. – Vol. 0(3–4)/ – P. 67–84.

20. BP Energy Outlook 2035. – 2016.

21. LNG SHIPPING AT 50. A COMMEMORATIVE SIGTTO/GIIGNL PUBLICATION. OCTOBER 2014.

22. IGU Annual Report 2019. – Available from : [https://www.igu.org/sites/default/files/ node-news_item-field_file/IGU%20Annual%20Report%202019_23%20loresfinal.pdf](https://www.igu.org/sites/default/files/node-news_item-field_file/IGU%20Annual%20Report%202019_23%20loresfinal.pdf).

23. World LNG Market Forecast 2018–2022 (2018). Westwood Global Energy Group.

24. Adeosun, M. Will New LNG Trade Routes Support Demand for LNG Carriers? / M. Adeosun. – 2017. – Available from : <http://www.maritime-executive.com/editorials/will-new-lng-trade-routes-support-demand-for-lng-carriers>. – 10.03.2019.

25. Khurana, G. Global shipping markets. Capital Link Greek Shipping Forum / G. Khurana. – 2017. – Available from : <http://forums.capitallink.com/shipping/2018greece//ppt/khurana.pdf> .

26. Propulsion Trends in LNG Carriers.MAN Diesel & Turbo. 5510-0035-02ppr Aug. 2013. – Available from : <https://www.scribd.com/document/255681462/Propulsion-Trends-in-Lng-Carriers>.

27. IGU World LNG Report – 2018 Edition. – 2018. – Available from : https://www.igu.org/sites/default/files/node-document-field_file/IGU_LNG_2018_0.pdf - 03.10.2019.

28. IMO (2015). Third IMO GHG Study 2014. Executive Summary and Final Report. International Maritime Organization, London, UK.

29. Farry, M. Ethane from as-sociated gas still the most economical / M. Farry. – 1998. – Retrieved from : [https://www.ogj.com/articles/ print/volume-96/issue-23/in-this-issue/gas-processing/ethane-from-associated-gas-still-the-most-economical.html](https://www.ogj.com/articles/print/volume-96/issue-23/in-this-issue/gas-processing/ethane-from-associated-gas-still-the-most-economical.html).

30. Impact of crude oil production on the petrochemical industry in Saudi Arabia / M. A. Al-Saleh, S. O. Duffuaa, M. A. Al-Marhoun, J. A. Al-Zayer. – 1991. – Retrieved from : <https://www.researchgate.net/>

publication/256569784_Impact_of_crude_oil_production_on_the_petrochemical_industry_in_Saudi_Arabia/figures.

31. Modelling and analysis of offshore energy systems on North Sea oil and gas platforms / T. Nguyen, B. Elmegaard, L. Pierobon, F. Haglind, P. Breuhaus // 53-rd Intern. Conf. of Scandinavian Simulation Society, SIMS. – 2012. – Retrieved from : https://www.researchgate.net/publication/263973093_Modelling_and_analysis_of_offshore_energy_systems_on_North_Sea_oil_and_gas_platforms/figures?lo=1.

32. Foss, M. M. Interstate natural gas – quality specifications & interchangeability / M. M. Foss // Center for Energy Economics. – 2004. – Retrieved from : http://www.beg.utexas.edu/files/energyecon/global-gas-and-lng/CEE_Interstate_Natural_Gas_Quality_Specifications_and_Interchangeability.pdf.

33. Oil & Gas Industry Overview. Crude Oil and Natural Gas: From Source to Final Products. – 2019. – Retrieved from : https://www.ihrdc.com/els/po-demo/module01/mod_001_02.htm.

34. WÄRTSILÄ. Wärtsilä Methane number calculator. – 2019. – Retrieved from : <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/gas-solutions/methane-number-calculator>.

35. WÄRTSILÄ. Wärtsilä GasReformer. – 2015. – Retrieved from : https://www.off-shore-europe.co.uk/__novadocuments/31687?v=635089663131000000.

36. Гимаева, А. Р. Технологии и технические средства, применяемые для получения метанола на морских месторождениях / А. Р. Гимаева, А. М. Шаммазов // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2013. – № 3. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-i-tehni-cheskie-sredstva-primenyaemye-dlya-poluchniya-metanola-na-morskih-mestorozhdeniyah>.

37. Remeljej, C. Methanol Floating Production Storage and Offloading (MFPSO) / C. Remeljej // Offshore Technology Conference. – 1999. – January 1. DOI:10.4043/10763-MS.

38. The process design and simulation for the methanol production on the FPSO (floating production, storage and off-loading) system / Won Seok Kim, Dae Ryook Yang, Dong Ju Moon, Byoung Sung Ahn // Chemical Engineering Research and Design. – May 2014. – Vol. 92, Iss. 5. – P. 931–940.

39. World's first floating methanol plant could play role in alleviating U.S. energy shortage. – Available from : <https://www.power-eng.com/2003/07/29/worlds-first-floating-methanol-plant-could-play-role-in-alleviating-us-energy-shortage/#gref>.

40. <https://www.offshoreenergytoday.com/abs-approves-wison-floating-gas-to-methanol-vessel-design>.

41. Cruise industry overview 2018. – Available at : <https://www.fcca.com/downloads/2018-Cruise-Industry-Overview-and-Statistics.pdf>

42. Bakountouzis, L. N. Marine power plants: design methodology and trends / L. N. Bakountouzis // Transactions on the Built Environment. – 1993. – Vol. 1. – P. 85–95.

43. IMO, 2014. Guidelines on the method of calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships. MEPC.245(66). MEPC 66/21/Add.1 p: 1. – Available at : <http://www.imo.org/en/OurWorkEnvironment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/MEPC.308%2873%29.pdf>.

44. IMO, 2015. MEPC.263 (68) – Amendments to the 2014 guidelines on the method of calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships. – Available at : <http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-%28MEPC%29/Documents/MEPC.263%2868%29.pdf>.

45. IMO, 2016. MEPC.281(70) – Amendments to the 2014 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships (Resolution MEPC.245(66), as Amended by Resolution MEPC.263(68)). – Available at : [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ IndexofIMOResolutions/Marine-](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-)

46. IMO, 2013. MEPC.1/Circ. 815: Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI. – Available at : <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Circ-815.pdf>.

47. Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013–2015 / N. Olmer et al. – Washington : ICCT, 2017. – 38 p.

48. Кучеренко, О. С. Оценка эффективности применения термохимической регенерации в ГТУ / О. С. Кучеренко, Е. Н. Пожидаева // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 7 (94). – С. 76–80.

49. Чередниченко, А. К. Показатели газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла / А. К. Чередниченко, О. В. Ощип // MOTROL. – Lublin, 2013. – Vol. 15, No. 2. – P. 165–170.

50. Improving the Efficiency of a Gas-Fueled Ship Power Plant by Using a Waste Heat Recovery Metal-Hydride System / O. Cherednichenko, M. Tkach, B. Timoshevskiy, V. Havrysh, S. Dotsenko // Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin. – 2019. – No. 59 (131). – P. 9–15. DOI: 10.17402/346.

51. Global Marine Fuel Trends 2030. – Available at : http://discovery.ucl.ac.uk/1472843/1/Global_Marine_Fuel_Trends_2030.pdf.

52. Носач, В. Г. Энергия топлива / В. Г. Носач. – Киев : Наук. думка, 1989. – 148 с.

53. Использование химической регенерации теплоты в газотурбинных и парогазовых установках / Г. П. Верхивкер, Кахер Абу Эльжадаиль, В. П. Кравченко и др. // Холодильная техника и технология. – 2000. – Вып. 69. – С. 85–90.

54. Шрайбер, О. А. Використання теплових вторинних енергоресурсів методом термохімічної регенерації. Розрахунок конверсії палива / О. А. Шрайбер // Проблеми загальної енергетики. – 2013. – № 2 (33). – С. 39–42.

55. Каменев В.Ф. Гибридное автотранспортное средство с энергетической установкой, работающей на водородном топливе / В.Ф. Каменев, Г.С. Корнилов, Н.А. Хрипач // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology ISJAEE. – 2004. – № 2(10) – С. 28–36.

56. Pashchenko D. Thermochemical recovery of heat contained in flue gases by means of bioethanol conversion. – *Therm Eng.* – 2013. – 60(6) – P. 438-443.

57. Чередніченко, О. К. Термохімічні технології для енергетичних модулів плавучих об'єктів нафтогазовидобутку та суден-газовозів : монографія / О. К. Чередніченко, С. І. Сербін. – Миколаїв : Видав. Торубара В. В., 2020. – 132 с.

58. Горбов, В. М. Основные тенденции применения газотурбинных установок на коммерческих судах / В. М. Горбов, А. К. Чередниченко // Газотурбинные технологии. – 2007. – № 9 (60). – С. 24–29.

59. Cherednichenko, O. Analysis of Efficiency of the Ship Propulsion System with Thermochemical Recuperation of Waste Heat / O. Cherednichenko, S. Serbin // Journal of Marine Science and Application. – 2018. – P. 1–9.

60. Чередниченко, А. К. Применение термохимической утилизации в энергетических установках высокотехнологичных судов / А. К. Чередниченко // Авиационно-космическая техника и технология, 2019. – № 7. – С. 58–64.

61. Cherednichenko, O. Application of thermo-chemical technologies for converging of associated gas in diesel-gas turbine installations for oil and gas floating units / O. Cherednichenko, S. Serbin, M. Dzida // POLISH MARITIME RESEARCH. – 2019. – No 3 (103), Vol. 26. – P. 181–187. DOI: 10.2478/pomr-2019-0059.

62. Cherednichenko, O. Investigation of the combustion processes in the gas turbine module of an FPSO operating on associated gas conversion products / O.

Cherednichenko, S. Serbin, M. Dzida // POLISH MARITIME RESEARCH. – 2019. – No 4 (104), Vol. 26 – P. 149–156. DOI: 10.2478/pomr-2019-0077.

63. Cherednichenko, O. Analysis of the Impact of Thermochemical Recuperation of Waste Heat on the Energy Efficiency of Gas Carriers / O. Cherednichenko, V. Mitienkova // J. Marine. Sci. Appl. – 2020. – <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00127-5>.

64. Дистель, Р. Теория графов / Р. Дистель. – Новосибирск : Ин-т математики, 2002. – 336 с.

65. Handling Complexity Aspects in Conceptual Ship Design / H. Gaspar, A. Ross, D. Rhodes, S. Erikstad // Int'l Maritime Design Conf. – Glasgow, 2012.

66. Erikstad, S. A Ship Design and Deployment Model for Non-Transport Vessels / S. Erikstad, S. Solem, K. Fagerholt // Ship Technology Research. – 2011. – Vol. 58, No. 3. – P. 132–141.

67. Ткач, М. Р. Эффективность энерготехнологических газотурбинных энергетических установок на базе альтернативных топлив для специализированных судов / М. Р. Ткач // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 3. – С. 1–3.

68. Головащенко, А. Ф. Энерготехнологические газотурбинные комплексы на базе альтернативных топлив / А. Ф. Головащенко, Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач // Судовое и энергетическое газотурбостроение. – Николаев : НПКГ «Зоря»–«Машпроект» : НО ИАУ, 2004. – Т. 1. – С. 281–285.

69. Ткач, М. Р. Моделирование эффективности газотурбинных энергетических установок с дополнительной камерой сгорания на базе альтернативных топлив для специализированных судов / М. Р. Ткач // Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2005. – № 2 (401). – С. 62–70.

70. Integration of different models in the design of chemical processes: Application to the design of a power plant / J. Caballero, M. Navarro, R. Femenia, I. Grossmann // Applied Energy. – 2014. – Vol. 124. – P. 256–273.

71. Haydary, J. Chemical Process Design and Simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys Applications. Bratislava : John Wiley & Sons, 2018. – 448 p.

72. Менин, Б. М. Универсальная метрика расчета погрешности математической модели технологического процесса и конструкций холодильного оборудования / Б. М. Менин // Науч. журн. НИУ ИТМО. Сер. Холодильная техника и кондиционирование. – 2016. – № 4. – С. 16–22.

73. Kat, C.-J. Validation metric based on relative error / C.-J. Kat, P. S. Els // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems: Methods, Tools and Applications in Engineering and Related Sciences. – 2012. – No 18 (5).

74. Бриллюэн, Л. Наука и теория информации / Л. Бриллюэн. – М. : ГИФМЛ, 1960. Доступно: <http://goo.gl/dtPLUr>.

75. Menin, B. M. Comparative error of the phenomena model / B. M. Menin // Intern. Referred Journal of Engineering and Science. – 2014. – № 3 (11). Доступно: <http://goo.gl/zMtMAU>

76. Ткач, М. Р. Термохимическая регенерация вторичных энергоресурсов тепловых двигателей. Часть 1 / М. Р. Ткач, А. К. Чередниченко, Б. Г. Тимошевский // Газотурбинные технологии. – 2012. – № 9 (110). – С. 34–39.

77. Експериментальне дослідження параметрів поршневого ДВЗ із системою термохімічної конверсії біоетанолу / Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. С. Митрофанов, А. С. Познанський, А. Ю. Проскурін // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2011. – № 2. – С. 3–8.

78. Показатели эффективности двигателя с искровым зажиганием 2Ч 7,2/6 при работе на синтез-газе / Б. Г. Тимошевский, М. Р. Ткач, А. С. Митрофанов, А. С. Познанский, А. Ю. Проскурин // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2013. – № 2. – С. 13–17.

79. Експериментальне дослідження параметрів поршневого ДВЗ з системою термохімічної конверсії біоетанол / Б. Г. Тимошевський та ін. // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2011. – № 2. – С. 3–8.

80. Эффективность энергетической установки на базе двигателя 1Ч 7,5/6 с термохимической утилизацией теплоты отходящих газов / Б. Г. Тимошевский и др. // Двигуни внутрішнього згорання. – 2015. – № 2. – С. 30–34.

81. Ткач М.Р., Тимошевский Б.Г., Тхы Б.А. Экспериментальные исследования показателей судового ДВС, использующего альтернативное топливо / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, Тхы Буй Ан // Двигуни внутрішнього згорання. – 2006. – № 2. – С. 114–118.

82. Чередниченко, А. К. Экспериментальный стенд для исследования термохимической конверсии биоэтанола вторичными энергоресурсами ГТД / А. К. Чередниченко, М. Р. Ткач // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 7 (94). – С. 65–69.

83. Чередниченко, А. К. Экспериментальная база для исследования конверсии биоэтанола регенерацией сбросного тепла газотурбинного двигателя / А. К. Чередниченко, М. Р. Ткач // MOTROL. – Lublin, 2012. – Т. 14. – С. 13–21.

84. Pat. 4246773 United States, G01N 29/02. Combustion property of gas measuring apparatus / Masao Haruta, Osaka Gas company Ltd.-appl. № 22357; Mar 20, 1979; data of patent Jan 27, 1981.

85. Пат. 114698 Україна. Спосіб вимірювання теплоти згорання суміші газів парової конверсії спиртів та пристрій для його здійснення / О. К. Чередніченко, М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський (Україна). – Заявл. 25.09.2013 ; опубл. 25.07.2017. Бюл. № 14.

86. Чередниченко, А. К. Методологическое обеспечение экспериментальных исследований элементов энергетических установок с термохимической регенерацией сбросного тепла / А. К. Чередниченко // Наук. вісн. ХДМА. – Херсон : ХДМА, 2016. – № 1 (14). – С. 274–280.

87. RINA. Significant Ships of 2016 // The Royal Institution of Naval Architects. – London, 2017. – P. 32–88.

88. GAS TURBINES READY FOR MER-CHANT SECTOR REVIVAL (Nov. 2013). – Available at : www.motorship.com.

89. GE Marine. Gas Turbine-Based Power & Propulsion systems for LNG Carriers. LNG 17, 2013.

90. The First Hybrid CRP-POD Driven Fast ROPAX Ferry in the World/ Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. // Technical Review. – 2004. – Vol. 41, No. 6 (Dec. 2004).

91. Visiongain (2012). The Mobile Offshore Drilling Units (MODU) Market 2012-2022. – Retrieved from : <https://www.marketresearch.com/product/sample-6889468.pdf>.

92. Stena Drilling (2018): Stena Drill MAX. – Retrieved from : http://stenadrillingmediabank.s3-eu-west-1.amazonaws.com/stena/wp-content/uploads/2018/04/11110204/Stena-DrillMAX_Technical-Specification_APR2018.pdf.

93. Stena Drilling (2018): Stena Don. – Retrieved from : https://www.stena-drilling.com/stena/wp-content/uploads/2017/08/80845_Stena_DON_Brochure_A4_FINAL_LO.pdf.

94. OCYAN (2017): TRANSOCEAN SPITSBERGEN. – Retrieved from : <https://www.deepwater.com/Documents/RigSpecs/Transocean%20Spitsbergen.pdf>.

95. https://www.solarturbines.com/en_US/products.html.

96. Offshore Magazine (2002): Leadon FPSO delivered on time, complete, within budget. – Retrieved from : <https://www.offshore-mag.com/production/article/16759844/leadon-fpso-delivered-on-time-complete-within-budget>.

97. ENI (2016): Block 15-06 East Hub Development Project. – Retrieved from : https://www.eni.com/docs/en_IT/enicom/publications-archive/publications/brochures-booklets/countries/brochure_eni_angola_ese_web.pdf.

98. Aker floating production (2009): FPSO Dhirubhai-1. – Retrieved from : <http://www.akerfloatingproduction.com/s.cfm/3-12/FPSO-Dhirubhai-1-Operation>.
99. OCYAN (2017): FPSO Pioneiro de Libra. – Retrieved from : <http://www.ocyansa.com/en/fleet/fps-pioneiro-de-libra>.
100. OCYAN (2017): FPSO Cidade de Itajaí. – Retrieved from : https://api.ocyansa.com/sites/default/files/2018-09/cidade_do_itajai_0.pdf.
101. Offshore Technology (2018): Triton Oil Field, North Sea Central. – Retrieved from : <https://www.offshore-technology.com/projects/triton/>
102. <https://www.nsenergybusiness.com/news/siemens-provide-gas-turbine-modec>.
103. PFLNG-2 / Rotan FLNG Project, Sabah. – Retrieved from : <https://www.offshore-technology.com/projects/pflng-2-rotan-flng-project-sabah>.
104. <https://www.icedesign.info/wp-content/uploads/ICE-1.6-M-Bbl-Generic-FPSO-Hull-G-1600-SM-2017.pdf>.
105. MAN Diesel & Turbo (2013): Offshore Power Module. – Retrieved from : https://marine.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocumentsarchive/offshore-power-module.pdf?sfvrsn=c2dd9a8_4.
106. Caterpillar Global Petroleum (2013): Offshore Power Generation Module. – Retrieved from : <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10340375>.
107. Siemens (2019): We power the world with innovative gas turbines Siemens gas turbine portfolio. – Retrieved from : <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/gas-turbines.html>.
108. Olszewski, W. Selected Combined Power Systems Consisted of Self-Ignition Engine and Steam Turbine / W. Olszewski, M. Dzida // Polish Maritime Research. – 2018. – No. 1, Vol. 25. – P. 198–203.
109. Domachowski, Z. Applicability of Inlet Air Fogging to Marine Gas Turbine / Z. Domachowski, M. Dzida // Polish Maritime Research. – 2019. – No.1, Vol. 26. – P. 15–19.

110. Mazzetti, M. J. Energy-Efficient Technologies for Reduction of Offshore CO₂ Emmissions / M. J. Mazzetti, P. Neksa // Oil and Gas Facilities. – February 2014. – P. 89–96.
111. Теория управления: терминология / отв. ред. Б. Г. Волик. – М. : Наука, 1988.
112. Рябинин, И. Теоретические основы проектирования электроэнергетических систем кораблей / И. Рябинин // ЛитРес. – 2017. – Режим доступа : <https://books.google.com.ua/books?id=iVpCDwAAQBAJ>.
113. Горбов, В. М. Анализ структурных схем энергетических установок круизных лайнеров / В. М. Горбов, А. К. Чередниченко // Вестн. СевНТУ. Севастополь : СевНТУ, 2009. – Вып. 97. – С. 38–42.
114. Горбов, В. М. Обеспечение надежности и живучести СЭУ на газотурбоэлектроходах / В. М. Горбов, А. К. Чередниченко // Вісн. СевНТУ. Вип. 87. Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь : СевНТУ, 2008. – С. 51–55.
115. Tarelko, W. Application of redundancy in ship power plants of offshore vessels / W. Tarelko // New Trends in Production Engineering. – 2018. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 443–452.
116. Tarelko, W. Redundancy as a way increasing reliability of ship power plants / W. Tarelko // New Trends in Production Engineering. – 2018. – Vol. 1, Iss. 1. – P. 515–522.
117. THE UK OIL AND GAS INDUSTRY ASSOCIATION LIMITED // Offshore Gas Turbines and Dry Low NO_x Burners. An analysis of the Performance Improvement. – 2015. – Retrieved from : <https://oilandgasuk.co.uk/wp-content/uploads/2015/05/produccys-cayrorgory.pdf>.
118. Głomski, P. Problems with Determination of Evaporation Rate and Properties of Boil-off Gas on Board LNG Carriers / P. Głomski, R. Michalski // Journal of Polish Cimas, Energetic aspects. – 2011. – Vol. 6, No. 1. – P. 133–140.

119. Methane Princess LNG Carrier. – Available from : <https://www.ship-technology.com/projects/methane-princess-lng-carrier>.

120. Горбов, В. М. Анализ и перспективы использования отечественных газотурбинных двигателей в судовой энергетике / В. М. Горбов, А. К. Чередниченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 7 (54). – С. 103–107.

121. Global Marine Fuel Trends 2030. – Available at : http://discovery.ucl.ac.uk/1472843/1/Global_Marine_Fuel_Trends_2030.pdf.

122 Cherednichenko, O. C. Efficiency Analysis of Methanol Usage for Marine Turbine Power Plant Operation Based on Waste Heat Chemical Regeneration / O. C. Cherednichenko // Problemele Energeticii Regionale. – Chişinău, 2019. – Vol. 1. – P. 102–111.

123. MAN Diesel & Turbo, 2014: LNG Carriers with ME-GI Engine and – High Pressure Gas Supply System. – Available from : <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/lng-carriers-with-high-pressure-gas-supply-system.pdf?sfvrsn=16>.

124. Крылов, О. В. Углекислотная конверсия метана в синтез-газ / О. В. Крылов // Российский химический журнал. – 2000. – Т. 44, № 1. – С. 19–33.

125. Tartakovsky, L. Fuel reforming in internal combustion engines / L. Tartakovsky, M. Sheintuch // Progress in Energy and Combustion Science. – 2018. – Vol. 67. – P. 88–114.

126. Dieuzeide, M. Thermodynamic analysis of glycerol steam reforming / M. Dieuzeide, N. Amadeo // Chemical Engineering Technology. – 2010. – Vol. 33. – P. 89–96.

127. Чередниченко, А. К. Повышение эффективности комбинированной энергетической установки термохимической регенерацией тепла / А. К. Чередниченко, М. Р. Ткач // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 7 (124). – С. 94–99.

128. Чередниченко, А. К. Оценка эффективности термохимической регенерации тепла в дизель-газотурбинной энергетической установке / А. К. Чередниченко // Наук. вісн. ХДМА. – Херсон : ХДМА, 2014. – № 2 (11). – С. 89–96.
- 129 Benito, A. Accurate determination of LNG quality unloaded in Receiving Terminals: An Innovative Approach / A. Benito // GERG Academic Net-work Event. – Brussels, 2009. – P. 1–23.
130. Dobrota, D. Problem of boil-off in LNG supply chain / D. Dobrota, B. Lalik, V. Komar // Transactions on Maritime Science. – 2013. – Vol. 2. – P. 91–100.
131. Ткач, М. Р. Эффективность газотурбинной установки с термодинамической и термохимической регенерацией тепла отходящих газов / М. Р. Ткач, А. К. Чередниченко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 7 (64). – С. 19–22.
132. API (2013). Carbon Content, Sampling, and calculation. American Petroleum Institute, API TR 2572.
133. Soave, G. Equilibrium Constants from a modified Redlich–Kwong equation of state / G. Soave // Chem. Eng. Sci. – 1972. – Vol. 27. – P. 1197–1203.
134. Peng, D.-Y. A new two-constant equation of state / D.-Y. Peng, D. B. Robinson // Ind. Eng. Chem. Fundament. – 1976. – Vol. 15. – P. 59–64.
135. Peng, D.-Y., Robinson, D. B. (1978). Peng-Robinson 78. Gas Proc. Assoc., Research Report 28.
136. Jaubert, J. Predictive Peng-Robinson 78 / J. Jaubert, F. Mutelet // J. Fluid. – 2004. – Vol. 224. – P. 285–304.
137. Jaubert, J. Soave–Redlich–Kwong – Jaubert–Privat / J. Jaubert, R. Privat // J. Fluid. – 2010. – Vol. 295. – P. 26–37.
138. Арутюнов, В. С. Окислительные превращения метана / В. С. Арутюнов, О. В. Крылов. – М. : Наука, 1998. – 361 с.

139. Rostrup-Nielsen, J. Concepts in Syngas Manufacture / J. Rostrup-Nielsen, L. J. Christiansen // Imperial College Press. – 2011. – P. 392.
140. Poran, A. Energy efficiency of a direct injection internal combustion engine with highpressure methanol steam reforming / A. Poran, L. Tartakovsky // Energy. – 2015. – Vol. 88. – P. 506–514.
141. Tartakovsky, L. Modeling Methanol Steam Reforming for Internal Combustion Engine / L. Tartakovsky, V. Baibikov, M. Veinblat // Energy and Power. – 2014. – Vol. 4 (1A). – P. 50–56.
142. Tartakovsky, L. Comparative performance analysis of SI engine fed by ethanol and methanol reforming products / L. Tartakovsky, V. Baibikov, M. Veinblat // SAE Technical Paper 2013-01-2617.
143. Poran, A. Performance and emissions of a direct injection internal combustion engine devised for joint operation with a highpressure thermochemical recuperation system / A. Poran, L. Tartakovsky // International journal of hydrogen energy. – 2017. – Vol. 42. – P. 214–266.
144. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер и др. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
145. Чередниченко, А. К. Критерии вибора состава установки мобильного энергокомплекса / А. К. Чередниченко // MOTROL. – Lublin, 2010. – Vol. 12A. – P. 7–14.
146. Чередниченко, А. К. Критерии выбора состава энергетической установки газовоза LNG / А. К. Чередниченко // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy. – 2016. – № 2. – С. 176–179.
147. Попырин, Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л. С. Попырин. – М. : Энергия, 1978. – 415 с.
148. Теоретические основы системных исследований в энергетике / А. З. Гамм, А. А. Макаров, Б. Г. Санеев и др. – Новосибирск : Наука, 1986. – 334 с.

149. Kamal, I. M. Al-Malah. Aspen Plus: Chemical Engineering Applications / I. M. Al-Malah . Kamal. – Hoboken ; New Jersey : John Wiley & Sons Inc, 2016. – P. 656.
150. Smith, R.A. et al. (1981). Two Phase Pressure Drop. HTFS Design Report 28.
151. Сорока, Я. Х. Теория и проектирование судовых газотурбинных двигателей / Я. Х. Сорока. – Л. : Судостроение, 1982. – 112 с.
152. Романовський, Г. Ф. Теоретичні основи проектування судових газотурбінних агрегатів / Г. Ф. Романовський, М. В. Ващиленко, С. І. Сербін. – Миколаїв : УДМТУ, 2003. – 304 с.
153. Локай, В. И. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов: теория, конструкция и расчет / В. И. Локай, М. К. МаксUTOва, В. А. Стрункин. – М. : Машиностроение, 1979. – 447 с.
154. Verbuck, V. M. Veckstein's method as a modification of the transversal method / V. M. Verbuck, D. I. Milman // USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 1977. – Vol. 17, Iss. 2. – P. 215–216.
155. Чередниченко, А. К. Моделирование энергокомплексов с термохимической регенерацией тепла для судов газозовов / А. К. Чередниченко // Вестник двигателестроения. – 2016. – № 2. – С. 36–41.
156. Чередниченко, А. К. Повышение тепловой экономичности ГТУ за счет регулирования температуры воздуха на входе ГТД / А. К. Чередниченко, Д. В. Дымо // 36. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК, 2007. – № 6. – С. 120–128.
157. Kayadelen, H. K. Thermoenvironomic evaluation of simple, intercooled, STIG, and ISTIG cycles / H. K. Kayadelen, U. Yasin // International Journal of Energy Research. – 2018– 42.12. – P. 3780-3802.
158. <https://www.wartsila.com/marine/build/fresh-water-generation/wartsila-reverse-osmosis>
159. <https://www.advisian.com/en/global-perspectives/the-cost-of-desalination#>

160. Voutchkov, N. Energy use for membrane seawater desalination – current status and trends / N. Voutchkov // Desalination. – 2017. – 431. – P. 2-14.

161. Configuration Discussions of the Chemically Recuperated Gas Turbine Powering a Ship / F. Pan, H. Zheng, P. Luo & R. L. Yang // Proceedings of the Intern. Conf. on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics. – Atlantis, 2015.

162. Kalinichenko, A. Heat Recovery Systems for Agricultural Vehicles: Utilization Ways and Their Efficiency / A. Kalinichenko, V. Havrysh, V. Hruban // Agriculture. – 2018. – Vol. 8 (12), No. 199. – P. 1–18. DOI: 10.3390/ agriculture8120199.

163. Meherwan, P. Boyce. Gas Turbine Engineering Handbook / P. Boyce Meherwan. – Elsevier Inc., 2006. – 936 p.

164. Особенности создания газотурбинной установки регенеративного цикла для ГПА / В. В. Романов и др. // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2009. – № 4 (40). – С. 16–19.

165. Integrated Plasma Coal Gasification Power Plant / I. Matveev, N. Waschilenko, S. Serbin, N. Goncharova // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, No. 12. – P. 3195-3200. DOI: 10.1109/ TPS.2013.2289908.

166. ANSYS Chemkin Theory Manual 17.0. – Reaction Design: San Diego. – 2015. – Available at : https://www.ems.psu.edu/~radovic/ChemKin_Theory_PaSR.pdf.

167. Development of an equilibrium-based model of gasification of biomass by Aspen Plus / A. Gagliano, F. Nocera, M. Bruno, G. Cardillo // Energy Procedia 111. – 2017. – Vol. 10. – P. 1010–1019.

168. Романовський, Г. Ф. Сучасні газотурбінні агрегати. Т. 1. Агрегати виробництва України та Росії / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв : НУК, 2005. – 344 с.

169. Cherednichenko, O. C. Efficiency Analysis of Methanol Usage for Marine Turbine Power Plant Operation Based on Waste Heat Chemical Regeneration / O. C. Cherednichenko // Problemele Energeticii Regionale. – Chişinău, 2019.

– Vol. 2019, Iss. 1. – P. 102–111. DOI: 10.5281/zenodo.2650429.

170. Чердниченко, А. К. Особенности применения продуктов конверсии метанола в судовой газотурбинной установке с термохимической регенерацией сбросного тепла / А. К. Чердниченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2019. – № 3. – С. 28–34. DOI: 10.32620/aktt.2019.3.03.

171. Тихонов, А. М. Регенерация тепла в авиационных ГТД / А. М. Тихонов. – М. : Машиностроение, 1977. – 108 с.

172. Кейс, В. М. Компактные теплообменники : пер. с англ. / В. М. Кейс, А. Л. Лондон. – М. : Госэнергоиздат, 1962. – 158 с.

173. Грязнов, Н. Д. Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок / Н. Д. Грязнов. – М. : Машиностроение, 1985. – 360 с.

174. Чердниченко, А. К. Повышение эффективности мобильных газотурбинных установок сложных циклов с применением промежуточного теплоносителя / А. К. Чердниченко, М. Р. Ткач, Н. В. Ващиленко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 7 (74). – С. 41–44.

175. Чердниченко, А. К. К выбору параметров промежуточного теплоносителя регенеративного газотурбинного цикла / А. К. Чердниченко, М. Р. Ткач // *Вестник двигателестроения*. – 2011. – № 2. – С. 101–105.

176. Чердниченко, А. К. Энергетические и массогабаритные показатели газотурбинных установок с промежуточным жидкометаллическим теплоносителем / А. К. Чердниченко // *Зб. наук. пр. НУК. – Миколаїв : НУК*, 2011. – № 5. – С. 76–83.

177. Чердниченко, А. К. Мобильные газотурбинные установки с промежуточным теплоносителем / А. К. Чердниченко // *MOTROL. – Lublin*, 2011. – Vol. 13A. – P. 25–30.4.

178. Газотурбинные установки сложных циклов с промежуточным теплоносителем / М. Р. Ткач, А. К. Чердниченко, Б. Г. Тимошевский, Н. В.

Ващенко // Газотурбинные технологии. – 2011. – № 10 (101). – С. 38–40.

179. Анализ влияния параметров промежуточного теплоносителя на характеристики регенеративного ГТД / М. Р. Ткач, А. К. Чердиченко, Б. Г. Тимошевский, Н. В. Ващенко // Газотурбинные технологии. – 2012. – № 1 (102). – С. 34–36.

180. Газотурбинные двигатели для энергетики и газотурбинные электростанции : каталог. – Николаев : НПКГ «Зоря»–«Машпроект», 2004. – 20 с.

181. <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/water/fresh/brochure-o-water-fresh-evaporator-msf.pdf>

182. Dimopoulos, G. G. Thermoeconomic Simulation of Marine Energy Systems for a Liquefied Natural Gas Carrier / G. G. Dimopoulos, A. Christos, A. Frangopoulos // Int. J. of Thermodynamics. – 2008. – Vol. 11, No. 4. – P. 195–201.

183. Чердиченко, А. К. Исследование эффективности дизель-газотурбинной энергетической установки с термохимической регенерацией тепла / А. К. Чердиченко // MOTROL. – Lublin ; Rzeszow, 2015. – Vol. 17, No. 2. – P. 25–28.

184. Cwilewicz, R. Proposal of ecological propulsion plant for LNG carries supplying liquefied natural gas to Świnoujście terminal / R. Cwilewicz, Z. Górski // Journal of Polish Cimac, Energetic aspects. – 2011. – Vol. 6, No. 1. – P. 25–31.

185. Чердиченко, А. К. Повышение эффективности энергетических установок судов-газовозов применением термохимических технологий / А. К. Чердиченко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2017. – № 1. – С. 46–51.

186. ISO/TR 22302:2014 (2014): Natural gas. Calculation of methane number.

187. Чердиченко, А. К. Влияние климатических факторов на эффективность утилизационной металлгидридной установки двухтопливного малооборотного ДВС газовоза / А. К. Чердиченко, М. Р. Ткач // Вісн. НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 10 (1232). – С. 85–91. DOI: 10.20998/2078-774X.2017.10.12.

188. Cherednichenko, O. Improving the Efficiency of a Gas-Fueled Ship Power Plant by Using a Waste Heat Recovery Metal-Hydride System / O. M. Tkach, B. Timoshevskiy, V. Havrysh, S. Dotsenko // *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. – 2019. – Vol. 59 (131). – P. 9–15. DOI: 10.17402/346.

189. Cherednichenko, O. The Usage of a Waste Heat Recovery Metal-Hydride Unit of Continuous Operation in the Maritime Energy / O. Cherednichenko, M. Tkach, S. Dotsenko // *IEEE Intern. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. – Kremenchuk, 2019. – P. 510–513. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896386.

190. Чередниченко, А. К. Об эффективности термохимической регенерации тепла в газотурбинных установках мобильных энергокомплексов / А. К. Чередниченко // *Вісн. НУК (електрон. вид.)*. – Миколаїв : НУК, 2010. – № 1.

191. Эффективность термохимической регенерации тепла в энергетической установке судна класса «река–море» / А. К. Чередниченко, М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевский, А. Ю. Проскурин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2016. – № 8 (135). – С. 29–35.

192. Чередниченко, А. К. Особенности применения продуктов конверсии метанола в судовой газотурбинной установке с термохимической регенерацией сбросного тепла / А. К. Чередниченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2019. – № 3. – С. 28–34. DOI: 10.32620/aktt.2019.3.03.

193. Пат. 93458 Україна, МПК F02C 6/20, 7/10. Газотурбінна установка / М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський, О. К. Чередніченко (Україна). – Заявл. 07.12.2009 ; опубл. 10.02.2011. Бюл. № 3.

194. Пат. 114166 Україна. Газотурбінна установка / О. К. Чередніченко, М. Р. Ткач, Б. Г. Тимошевський (Україна). – Заявл. 25.05.2012 ; опубл. 10.05.2017. Бюл. № 9.

195. Патанкар, С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. В. Патанкар ; пер. с англ. под ред. В. Д. Виленского. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
196. Batchelor, G. K. An Introduction to Fluid Dynamics / G. K. Batchelor. – Cambridge : Univ. Press, 1967. – 615 p.
197. Сербин, С. И. Низкоэмиссионные камеры сгорания ГТД : монография / С. И. Сербин, А. Б. Мостипаненко, Н. А. Гончарова – Николаев : издат. Торубара В. В., 2016. – 216 с.
198. Study of burning stability in low emission gas turbine combustor (Book Chapter) / S. Serbin, A. Kozlovskyi, K. Burunsuz, R. Radchenko // In: Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer. Vol. 2. Monography No. 360 of the faculty of Mechanical Engineering: Koszalin University of Technology, 2019. – P. 747–766.
199. Choudhury, D. Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling / D. Choudhury // Lebanon Fluent Inc.: Technical Memorandum TM-107. – 1993.
200. The Generalized Finite-Rate Formulation for Reaction Modeling. – Available from : http://www.arc.vt.edu/ansys_help/flu_th/flu_th_sect_finite_rate.html.
201. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл ; пер. с англ. Г. Л. Агафонова ; под ред. П. А. Власова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.
202. Fenimore, C. P. Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames / C. P. Fenimore // Proc. 13th Symp. (Intern.) on Combustion. – The Combustion Institute, USA, 1971. – P. 373–376.
203. De Soete, G. G. Overall Reaction Rates of NO and N Formation from Fuel Nitrogen / G. G. de Soete // Proc. In 15th Symp. (Intern.) on Combustion. – The Combustion Institute, USA, 1975. – P. 1093–1102.

204. Pascale, A. Numerical simulation of biomass derived syngas combustion in a swirl flame combustor / A. Pascale, M. Fussi, A. Peretto // ASME. GT-2010-22791. – 2010.

205. An optimized detailed chemical reaction mechanism for methane combustion GRI-Mech 3.0 / G. P. Smith, D. M. Golden, M. Frenklach et al. – Available from : http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.

206. Сербин, С. И. Характеристики камеры сгорания ГТД мощностью 2,5 МВт, работающей на синтез-газе / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 7 (94). – С. 119–123.

207. Serbin, S. Investigations of a Gas Turbine Low-Emission Combustor Operating on the Synthesis Gas / S. Serbin, N. Goncharova // International Journal of Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 2017. – 14 p.

208. Synthesis Gas Afterburner Based on an Injector Type Plasma-Assisted Combustion System / I. B. Matveev, S. I. Serbin, V. V. Vilkul, N. A. Goncharova // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2015. – Vol. 43, No. 12. – P. 3974–3978.

209. Matveev, I. B. Flame Control-Combustion Sustaining / I. B. Matveev, S. I. Serbin // In: Plasma Assisted Combustion, Gasification, and Pollution Control. Vol. 2. Combustion and Gasification. – Printed in the USA : Outskirts Press, Inc., 2016. – P. 215–293.

210. Сербин, С. И. Исследование особенностей рабочего процесса камеры сгорания ГТД мощностью 2,5 МВт, работающей на синтез-газе / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова, В. В. Вилкул // Весту. НТУ "ХПИ". Темат. вып. Енергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2015. – № 16 (1125). – С. 14–18.

211. Пат. 93619 Україна. Камера згоряння / С. І. Сербін, Н. О. Гончарова, О. К. Чередніченко (Україна). – Заявл. 25.04.2014 ; опубл. 10.10.2014. Бюл. № 19.

212. Farry, M. Ethane from associated gas still the most economical / M. Farry. – Available from : <https://www.ogj.com/articles/print/volume-96/issue-23/in-this->

issue/gas-processing/ethane-from-associated-gas-still-the-most-economical.html, 1998.

213. Совершенствование экологических характеристик ГТД НПП «Машпроект» / В. И. Романов, О. Г. Жирицкий, А. В. Коваленко и др. // Известия Академии инженерных наук Украины. – Николаев : НПП «Машпроект», 1999. – № 1. – С. 98–102.

214. Буданова, Н. А. Создание низкоэмиссионных камер сгорания для газотурбинных двигателей ДН70, ДН80, ДБ90 / Н. А. Буданова, В. Г. Ванцовский, Е. В. Коротич // Судовое и энергетическое газотурбостроение. Т. 1. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки. – Николаев : НПКГ «Зоря»–«Машпроект», 2004. – С. 31–35.

215. Романовский, Г. Ф. Плазмохимические системы судовой энергетики / Г. Ф. Романовский, С. И. Сербин. – Николаев : УГМТУ, 1998. – 246 с.

216. Serbin, S. I. Investigations of Nonstationary Processes in Low Emissive Gas Turbine Combustor with Plasma Assistance / S. I. Serbin, A. V. Kozlovskyi, K. S. Burunsuz // IEEE Transactions on Plasma Science. – Special Issue on Plasma-Assisted Technologies, 2016. – Vol. 44, Iss. 12. – P. 2960–2964.

217. Директива 2010/75/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 24 листопада 2010 року про промислові викиди (інтегроване запобігання та контроль забруднення) // Офіційний вісник Європейського Союзу, L334/17. – 17.12.2010 р.

218. Пат. 106386 Україна. Камера згоряння / С. І. Сербін, О. К. Чередніченко, А. В. Козловський, Г. Б. Мостіпаненко (Україна). – Заявл. 21.10.15 ; опубл. 25.04.2016. Бюл. № 8.

219. <https://www.rina.org.uk>.

220. Wärtsilä (2018). Wärtsilä 50DF Product Guide.

221. Siemens (2017). Siemens gas turbine portfolio.

222. MAN Diesel & Turbo (2017) Cost-Optimised Designs of ME-GI Fuel Gas

Supply Systems [Online]. – Available from : https://marine.man-es.com/docs/librariesprovider6/test/cost-optimised-designs-of-me-gi-fuel-gas-supply-systems.pdf?sfvrsn=72fbeca2_6.

223. <https://www.nauticexpo.com/prod/incat/product-27117-397847.html>.

224. Eriksson, M. LCAs of Petrol and Diesel—A Literature Review / M. Eriksson, S. Ahlgren // Swedish University of Agricultural Science: Uppsala, Sweden, 2013. – Available online : https://pub.epsilon.slu.se/10424/17/ahlgren_s_and_eriksson_m_130529.pdf (accessed on 12 February 2020).

225. The well-to-wheel analysis of hydrogen enriched compressed natural gas for heavy-duty vehicles using life cycle approach to a fuel cycle / P. Gupta, W. Zhuge, S. Luo, F. Ma // Int. J. Low-Carbon Technol. – 2019. – Vol. 14. – P. 432–439.

226. Life Cycle Greenhouse Gas Perspective on Exporting Liquefied Natural Gas from the United States: 2019 Update / S. Roman-White, S. Rai, J. Littlefield, G. Cooney, T. J. Skone. – National Energy Technology Laboratory : Pittsburgh, PA, USA, 2019.

227. Ingham, A. Reducing the Carbon Intensity of Methanol for Use as a Transport Fuel / A. Ingham // Johns. Matthey Technol. Rev. – 2017. – Vol. 61. – P. 297–307.

228. Kajaste, R. Methanol-Managing greenhouse gas emissions in the production chain by optimizing the resource base / R. Kajaste, M. Hurme, P. Oinas // AIMS Energy. – 2018. – Vol. 6. – P. 1074–1102.

229. Kumar, D. Life cycle assessment of energy and GHG emissions during ethanol production from grass straws using various pretreatment processes / D. Kumar, G. S. Murthy // Int. J. Life Cycle Assess. – 2012. – No. 17. – P. 388–401.

230. Kalinichenko, A. The Acceptable Alternative Vehicle Fuel Price / A. Kalinichenko, V. Havrysh, I. Atamanyuk // Energies. – 2019. – No. 12. – P. 3889.

231. Goncharuk, A. G. National features for alternative motor fuels market / A. G. Goncharuk, V. I. Havrysh, V. S. Nitsenko // Int. J. Energy Technol. Policy. – 2018. – No.14. – P. 226–249.

232. Global Average Bunker Price. – Available online :

<https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-glb-globalaverage-bunker-price#MGO>.

233. Ismail, N. Water Supply Cost For Offshore Platforms / N. Ismail, , M. Z. Ahmad, M. N. Hussain, A. N. Ariffin // *International Journal of Scientific & Technology Research* – 2019. – 8. P. 58-64

234. A detailed guide for CHP developers – Part 2
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/345189/Part_2_CHP_Technology.pdf.

235. Han, J. State of the Art of Fuel Cells for Ship Applications. HAL-01073612 / J. Han, J. F. Charpentier, T. Tang. – 2015. – <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01073612>. DOI: 10.1109/ISIE.2012.6237306.

236. Vogler, F. Fuel cells in maritime applications. Challenges, chances and experience / F. Vogler, G. Würsig. – 2010. – <http://conference.ing.unipi.it/ichs2011/papers/158.pdf>.

237. Welaya, Y. M. A. Thermodynamic analysis of a combined gas turbine power plant with a solid oxide fuel cell for marine applications / Y. M. A. Welaya, N. R. Ammar // *Intern. Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. – 2013. – No. 5 (4). – P. 529–545. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0151.

238. Lemański, M. Analysis strategies for gas turbine-solid oxide fuel cell hybrid cycles, Technical, Economic, and Environmental Aspects of Combined Cycle Power Plants / M. Lemański, J. Topolski, J. Badur // Editor Z. Domachowski. – Gdańsk : TU Press, 2004. – P. 213–220.

239. Saisirirat, P. The Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) and Gas Turbine (GT) Hybrid System Numerical Model / P. Saisirirat // *Energy Procedia*. – 2015. – No. 79. – P. 845–850. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.576.

240. Tunca, F. Thermodynamic Analysis of Gas Turbine – Solid Oxide Fuel Cell (GT-SOFC) Aircraft Auxiliary Power Unit (APU) / F. Tunca, N. Kaya // *Int. Journal of Advances in Mechanical & Automobile Engg. (IJAMAE)*. – 2017. – No. 4 (1). – P. 10–14.

241. Zaccaria, V. Gas turbine advanced power systems to improve solid oxide fuel cell economic viability / V. Zaccaria, D. Tucker, A. Traverso // Journal of the Global Power and Propulsion Society. – 2017. – No. 1. – P. 28–40. DOI: 10.22261/JGPPS.U96IED.

242. National Fuel Cell Research Center. Hybrid Fuel Cell/Gas Turbine Systems. Analyses of Hybrid Fuel Cell Gas Turbine Systems. – 2010. – http://www.nfcrc.uci.edu/PDF_Research_Summaries/HYBRIDfuelCELL_GAS turbineSystems-AnalysesHybridFuelCellGasTurbineSystems.pdf.

243. Cherednichenko O. Local Green Power Supply Plants Based on Alcohol Regenerative Gas Turbines: Economic and Environmental Aspects / O. Cherednichenko, V. Havrysh, V. Shebanin, A. Kalinichenko, G. Mentel, J. Nakonieczny // *Energies* – 2020. – 13 – 2156.

244. Горбов В. М. Обеспечение функционального резервирования мощности пропульсивного комплекса на газотурбоэлектроходах [Текст] / В.М.Горбов, А.К. Чередниченко // Безопасность мореплавания и ее обеспечение при проектировании и постройке судов: Тез. доп. Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2007. С. 15-16.

245. Чередниченко А. К. Повышение тепловой экономичности ГТУ за счет регулирования температуры воздуха на входе ГТД [Текст] / А.К. Чередниченко, Д.В. Димо // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. III Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2007, – С. 42-43.

246. Чередниченко А. К. Повышение эффективности энергетических установок путем термохимической регенерации [Текст] // Муніципальна енергетика: проблеми, рішення / Збірник наукових праць III Міжнарод. наук.-техн. конф.- Миколаїв: НУК, 2009. с. 83-84.

247. Чередниченко А. К. Улучшение экологических характеристик мобильных энергокомплексов термохимической регенерацией вторичных энергоресурсов [Електронне видання] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні/ Матеріали V Міжнарод. наук.-техн. конф.

– Миколаїв: НУК, 2010 (Режим доступу: <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail?conferenceId=7&lectureId=1373>)

248. Чередниченко А. К. Повышение надежности и экологической безопасности мобильных энергокомплексов высокотехнологичных объектов [Електронне видання] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні/ Матеріали V Міжнарод. наук.-техн. конф.

– Миколаїв: НУК, 2010 (Режим доступу: <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail?conferenceId=7&lectureId=1373>)

249. Чередниченко А. К. Газотурбинные установки с промежуточным теплоносителем для судов FPSO – инновационные энергетические комплексы [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач, Н.В. Ващенко // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці/ Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010, с.158-159.

250. Чередниченко А. К. Оценка значимости критериев выбора состава установки судового энергокомплекса [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці// Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010, с.195-197.

251. Чередниченко А. К. Улучшение экологических показателей газотурбинной установки применением промежуточного теплоносителя [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці/ Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010, с.337-338.

252. Чередниченко А. К. Определение параметров регенератора ГТД с промежуточным теплоносителем [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Сучасний стан та проблеми двигунобудування / Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010, с.92-93.

253. Чередниченко А. К. О рациональных параметрах промежуточного теплоносителя регенеративного теплообменника газотурбинного двигателя [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Сучасний стан та проблеми двигунобудування / Матеріали I Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2010, с.94-95.

254. Чередниченко А. К. Улучшение экологических характеристик газотурбинных энергетических комплексов применением воздушной утилизации с промежуточным теплоносителем [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач, Н.В. Ващиленко// Проблемы екології та енергозбереження в суднобудуванні Матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011, с.26-28.

255. Чередниченко А. К. Применение газотурбинных установок сложных циклов в составе энергокомплексов объектов океанотехники [Текст] / Проблемы екології та енергозбереження в суднобудуванні Матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011, с.49-52.

256. Чередниченко А. К. Інноваційні енергокомплекси на базі газотурбінних двигунів з рідинно-металевим теплоносієм [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці/ Матеріали II Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011, с.219-221.

257. Чередниченко А. К. Анализ применимости методов конверсии углеводородного топлива для газотурбинных энергокомплексов морских объектов нефтегазодобычи [Текст] / А.К. Чередниченко, О.В. Ощип // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. V Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011, – С. 96-98.

258. Чередниченко А. К. Анализ влияния параметров промежуточного жидкометаллического теплоносителя на характеристики регенеративного газотурбинного двигателя [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. V Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2011, – С. 175-176.

259. Чередниченко А.К. Применение жидкометаллического промежуточного теплоносителя в системах воздушного аккумулирования энергии [Текст] /А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Муніципальна енергетика: проблеми, рішення / Збірник наукових праць IV Міжнарод. наук.-техн. конф.- Миколаїв: НУК, 2011. с. 66-67.

260. Чередниченко А. К. Снижение теплового загрязнения регенерацией тепла в установках с промежуточным теплоносителем [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні Матеріали VII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2012, с.58.

261. Чередниченко А. К. Применение промежуточного теплоносителя в составе энергокомплекса с термохимической конверсией биоэтанола [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці/ Матеріали III Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2012, с.235-236.

262. Чередниченко А. К. Модернизация экспериментальной базы для исследования процессов термохимической регенерации сбросного тепла газотурбинного двигателя [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Сучасний стан та проблеми двигунобудування / Матеріали II Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2012, с.190-191.

263. Чередниченко А. К. Рациональные диапазоны применения основных способов регенерации тепла [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський // XVIII – міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2013. – С. 110.

264. Чередниченко А. К. Перспективные методы регенерации тепла в энергетических установках [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевський // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2013, – С. 28-31..

265. Чередниченко А. К. Повышение эффективности комбинированной энергетической установки путем термохимической конверсии углеводородных топлив [Текст] / А.К. Чередниченко, М.Р. Ткач // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2013, – С. 47-49.

266. Чередніченко О. К. Безперервне вимірювання теплоти згоряння суміші газів парової конверсії спиртів [Текст] /О.К. Чередніченко, М.Р. Ткач // Муніципальна енергетика: проблеми, рішення / Збірник наукових праць V Міжнарод. наук.-техн. конф.- Миколаїв: НУК, 2013. с. 160-162.

267. Чередниченко А. К. Выбор параметров промежуточного теплоносителя для воздушно-аккумулирующих газотурбинных электростанций [Текст] / Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2014, с. 125-126.

268. Чередниченко А. К. Моделирование процесса паровой конверсии биоэтанола в схеме газотурбинной установки с термохимической регенерацией тепла [Текст] / А.К. Чередниченко, А.К. Басов // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали V Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2014, с.220-221..

269. Чередниченко А. К. Когенерационные энергетические комплексы с промежуточным теплоносителем [Текст] / Сучасний стан та проблеми двигунобудування. Матеріали III Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2014, с.17-18.

270. Чередниченко А. К. Анализ состава энергетических установок газозовозов [Текст] / Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті. Матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2015, с. 329-331.

271. Чередниченко А. К. Исследование эффективности термохимической регенерации тепла в энергетической установке газозова LNG [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2015, с.184-185.

272. Чередниченко А. К. Влияние состава перевозимого газозовом LNG груза на эффективность энергетической установки с термохимической регенерацией тепла [Текст] / О.К. Чередніченко, М.Р. Ткач // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 6 Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2015, с. 82-83.

273. Чередниченко А. К. Development of advanced Propulsion Plant for LNG carrier [Текст] / Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VII Міжнарод. наук.-техн. конф. Часть 1. – Миколаїв: НУК, 2015, – С. 59-62.

274. Чередниченко А. К. Учет гидрометеорологических факторов при математическом моделировании условий эксплуатации судомеханического комплекса газовоза LNG [Текст] / А.К. Чередниченко, Б.М. Личко // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VII Міжнарод. наук.-техн. конф. Часть 1. – Миколаїв: НУК, 2015, – С. 227-232..

275. Чередниченко А. К. Многоуровневая декомпозиция в экспериментальном исследовании судовых энергетических установок [Текст] / Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті. Матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2016, с. 397-398.

276. Чередниченко А. К. Комплексное исследование эффективности судовых энергетических установок газовозов LNG с термохимической регенерацией тепла [Електронне видання] / Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні Матеріали XI Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2016. <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail?lectureId=36342&conferenceId=35927&isProjectorView=false>

277. Чередниченко А. К. Математическое моделирование процессов в судовых энергетических установках с термохимической регенерацией тепла [Текст] / Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 7 Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2016, с. 87.

278. Чередниченко А. К. Исследование характеристики энергокомплексов с термохимической регенерацией для объектов океанотехники [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали VII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2016, с.153-154.

279. Чередниченко А. К. Применение объектно-ориентированных подходов при исследованиях элементов энергетических установок с термохимической регенерацией сбросного тепла [Текст] / Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування. Матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2016, с.11-12.

280. Чередниченко А. К. Performance Analysis of Combined Gas Turbine – Diesel Power Plant with Thermo Chemical Recuperation of Waste Heat [Текст] / Сучасний стан та проблеми двигунобудування. Матеріали IV Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2016, с.5-9.

281. Чередниченко А. К. Эффективность использования выпара груза в перспективных энергетических установках судов газозовов [Текст] / Казахстан-Холод 2017: Сб. докл. межд.науч.-техн. конф. – Алматы: АТУ, 2017. С. 264-267.

282. Чередниченко А. К. Экологические аспекты использования выпара груза в перспективных энергетических установках судов газозовов [Текст] / Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні Матеріали XII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2017, с.61-65.

283. Чередниченко А. К. Применение методологии системной динамики при моделировании процессов в перспективных энергетических установках газозовов [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали VIII Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2017, с.171-172.

284. Чередніченко О. К. Дослідження енергетичних витрат на привід установки подачі газу для головних двигунів суден газозовів [Текст] / А.К. Чередниченко, Н.В. Коробейнікова, В.О. Карташов // Холод в енергетиці і на транспорті. Збірник наукових праці IV Міжнародної науково-технічної конференції. –Миколаїв: НУК, 2017. – с. 281-283.

285. Чередниченко А. К. Комплексное исследование эффективности применения термохимических технологий в судовых энергетических установках газозовов [Текст] / Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VIII Міжнарод. наук.-техн. конф. Часть 1. – Миколаїв: НУК, 2017, – С. 32-37.

286. Чередниченко А.К. Моделирование эксплуатационных характеристик пропульсивных комплексов судов газозовов с учетом влияния гидрометеорологических факторов [Текст] / А.К. Чередниченко, Б.М. Личко // Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. VII Міжнарод. наук.-техн. конф. Часть 1. – Миколаїв: НУК, 2017, – С. 99-101.

287. Чередніченко А. К. Исследование эффективности судовой комбинированной энергетической установки с термохимической утилизацией вторичных энергоресурсов [Текст] / Муніципальна енергетика: проблеми, рішення / Збірник наукових праць VII Міжнарод. наук.-техн. конф.- Миколаїв: НУК, 2017. с. 110-117.

288. Cherednichenko O. C. The estimation of power consumption of gas preparation unit for marine dual-fuel propulsion engines / Kazakhstan-Refrigeration 2018: Proceedings of the Conference. – Almaty: ATU, 2018. – с.199-201.

289. Cherednichenko O. C. Mathematical modeling of processes in advanced power plants of gas carriers / Materials of XIII International scientific-technical conference WATER TRANSPORT PROBLEMS – Baki: Azerbaijan State Marine Academy, 2018. – p.145-149.

290. Чередниченко А. К. Анализ эффективности транспортной энергетической установки с термохимической утилизацией сбросного тепла [Текст] / Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 9 Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2018, с. 99–200.

291. Чередниченко А. К. Дослідження впливу характеристик палив на ефективність використання термохімічних технологій в енергетичних установках суден та об'єктів океанотехніки [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали IX Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2018, с. 71-72.

292. Чередніченко О. К. Энергоеффективность судовых энергетических установок с термохимическим перетворенням енергії [Текст] / Сучасний стан та проблеми двигунобудування. Матеріали V Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2018, с.14-15.

293. Чередниченко А. К. Термохимические технологии утилизации вторичных энергоресурсов судовых энергетических установок [Текст] / А.К. Чередниченко, Н.В. Коробейникова // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології

та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 10 Міжнарод. наук.-практ. конф. – Херсон, ХДМА, 2019, с. 158–160.

294. Чередниченко А. К. Підвищення ефективності енергетичних установок високотехнологічних суден використанням термохімічної утилізації [Текст] / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали X Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2019, с. 406-411.

295. Чередниченко А. К. Розробка технології термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів теплових двигунів судових енергетичних установок [Текст] / Суднова енергетика: стан та проблеми: Тези доп. IX Міжнарод. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2019, – С. 18-21.

ДОДАТКИ

Додаток А

Розрахунок досяжної мінімальної порівняльної похибки при моделюванні процесів енергоперетворення

Додаток А.1

Таблиця А1.1 Визначення класу явищ

Основні змінні системи SI	Опис явища			
	Стационарний процес тепломасообміну	Стационарний процес тепломасообміну з урахуванням термохімічних перетворень	Нестационарний процес тепломасообміну	Нестационарний процес тепломасообміну з урахуванням термохімічних перетворень
L – довжина	X	X	X	X
M – маса	X	X	X	X
T – час			X	X
Θ – температура	X	X	X	X
F – кількість речовини		X		X
I – сила току				
J – інтенсивність світла				
Клас явища	$LM\Theta$	$LM\Theta F$	$LMT\Theta$	$LMT\Theta F$

Розрахунок [74,75]:

Порівняльну похибку розраховують за формулою

$$\varepsilon = \Delta u_{pmt}/S \leq [(z^I - \beta^I)/N_{SI} + [(z^{II} - \beta^{II}) / (z^I - \beta^I)],$$

де Δu_{pmt} – безрозмірна абсолютна похибка моделі, яка пов'язана з кінцевим числом змінних; S – інтервал значень безрозмірної досліджуваної змінної u ; z^I – кількість фізичних розмірних змінних у обраному КЯ; β^I – кількість первинних фізичних розмірних змінних у обраному КЯ; z^{II} – кількість фізичних розмірних змінних в обраній моделі; β^{II} – кількість первинних фізичних розмірних змінних в обраній моделі; N_{SI} – найбільша кількість безрозмірних комплексів.

$$(z^l - \beta^l) = (e_l \cdot e_m \dots) - 1/2 - 7,$$

де $e_l, e_m, e_t, e_i, e_\theta, e_j, e_f$ – кількість варіантів розмірності (табл. А1.2)

Таблиця А1.2 Визначення кількості варіантів розмірності

Змінна	L	M	T	Θ	F
Області варіювання показнику ступеня змінної	$-3 \leq l \leq +3$	$-1 \leq m \leq +1$	$-4 \leq t \leq +4$	$-4 \leq \theta \leq +4$	$-1 \leq f \leq +1$
Кількість варіантів розмірності, e	7	3	9	9	3

$$(z^{\parallel} - \beta^{\parallel}) = (z^l - \beta^l)^2 / N_{SI},$$

де $N_{SI} = (e_l \cdot e_m \cdot e_t \cdot e_i \cdot e_\theta \cdot e_j \cdot e_f - 1) / 2 - 7 = 38265$.

Таблиця А1.3 Мінімальна порівняльна похибка

Клас явища	$(z^l - \beta^l)$	$(z^{\parallel} - \beta^{\parallel})$	Мінімальна порівняльна похибка ε_{\min}
$LM\Theta$	$(7 \cdot 3 \cdot 9 \cdot -1) / 2 - 3 = 91$	$91^2 / 38265 \approx 0,2$	0,00476
$LM\Theta F$	$(7 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 3 - 1) / 2 - 4 = 279$	$279^2 / 38265 \approx 2,0$	0,01458
$LMT\Theta$	$(7 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 9 - 1) / 2 - 4 = 846$	$846^2 / 38265 \approx 19,0$	0,04457
$LMT\Theta F$	$(7 \cdot 3 \cdot 9 \cdot 9 \cdot 3 - 1) / 2 - 5 = 2546$	$2546^2 / 38265 \approx 169,0$	0,13307

Додаток Б
Патенти за темою дисертаційного дослідження

Додаток Б.1







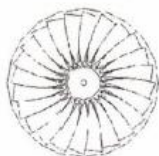
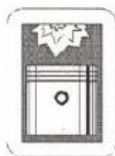






Додаток В
Витяг з рішення XXIV Міжнародного конгресу двигунобудівників

Додаток В.1



" Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»
Національний технічний університет «ХПІ»
ДП «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС» АТ «Мотор Січ» ПАТ «ФЕД»
Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

XXIV МІЖНАРОДНИЙ КОНГРЕС ДВИГУНОБУДІВНИКІВ

2-7 вересня 2019 г.

Харків – Миколаїв – Коблеве

E-mail: НАУ «ХАІ» – aedlab@gmail.com, НТУ «ХПІ» – marchenko@kpi.kharkov.ua

ВИТЯГ З РІШЕННЯ
«XXIV міжнародного конгресу двигунобудівників»

На засіданні XXIV міжнародного конгресу двигунобудівників, заслухана доповідь за результатами дисертаційної роботи, кандидата технічних наук, докторанта Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова Чередніченко Олександра Костянтиновича, здобувача наукового ступеня доктора технічних наук, за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

Дисертаційна робота «НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ТЕРМОХІМІЧНОЮ УТИЛІЗАЦІЄЮ ДЛЯ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ СУДЕН» присвячена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми - визначення закономірностей процесів енергоперетворення при термохімічній утилізації вторинних енергоресурсів теплових двигунів та створення на їх основі енергетичних установок високотехнологічних суден.

В обговоренні доповіді взяли участь д.т.н., проф. Білогуб О.В., д.т.н., проф. Ткач М.Р., д.т.н., проф. Єпіфанов С.В.

Виступаючі відмітили, що фрагменти роботи заслуховувались на попередніх засіданнях Конгресу. Відзначена актуальність теми, достатній рівень проведених наукових досліджень і наукову новизну отриманих результатів.

В роботі розв'язана науково-прикладна проблема розробки науково-технічних основ реалізації ефективних процесів енергоперетворення в енергетичних установках високотехнологічних суден шляхом термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів суднових теплових двигунів.

Робота може подаватися до спеціалізованої вченої ради за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

ГОЛОВА СЕКЦІЇ
чл-кор. НАНУ

Вчений секретар конгресу
д-р техн. наук

Тимошенко В.І.

Білогуб О.В.

Додаток Г Документи про впровадження роботи

Додаток Г.1

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН
«УКРОБОРОНПРОМ»

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДОСЛІДНО-ПРОЕКТНИЙ
ЦЕНТР КОРАБЛЕБУДУВАННЯ»

просп. Героїв України, 1-Е, м. Миколаїв, Україна, 54025
тел.: +38 (0512) 766 521, факс: +38 (0512) 766 520
www.srdsc.com, e-mail: office@srdsc.com
Код ЄДРПОУ 14307618



STATE CONCERN
“UKROBORONPROM”

STATE RESEARCH & DESIGN
SHIPBUILDING CENTRE

1-E, Geroyiv Ukrainy Ave., Mykolaiv, Ukraine, 54025
phone: +38 (0512) 766-521, fax: +38 (0512) 766 520
www.srdsc.com, e-mail: office@srdsc.com
Code 14307618

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор, генеральний конструктор

В.Є. Борисов

« 3 » 09 2020 р.



АКТ ПРО ВИКОРИСТАННЯ

результатів дисертаційного дослідження Чередніченко О. К.
«Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами для
високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування»

За ініціативою Машинобудівного навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова та у відповідності з Договором про науково-технічне співробітництво від 29.04.2020 р. виконано дослідження ефективності використання термохімічної утилізації вторинних енергоресурсів енергетичної установки морської платформи.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої проблеми національної безпеки – забезпеченню енергетичної незалежності країни та диверсифікації ринку органічних палив шляхом ефективного використання різних його типів.

Практична реалізація методів розрахунку процесів перетворення енергії в системах обробки вуглеводневого палива та процесів в камерах згоряння, які працюють на продуктах конверсії, надала можливість порівняння ефективності різних схемних рішень газотурбінної енергетичної установки потужністю 10-15 МВт з термохімічною обробкою попутного нафтового газу. Виявлено, що при базових параметрах ГТД українського виробника ККД запропонованої автором установки з термохімічною утилізацією лежить в діапазоні 46-50 %.

В дисертаційній роботі обрано основне устаткування енергетичної установки з системою термохімічної утилізації, розроблено рекомендації щодо вибору параметрів підсистеми обробки палива. Надані рекомендації забезпечують зменшення питомої витрати палива в енергетичній установці до 20 % та викидів діоксиду вуглецю CO₂ на 30 %.



Результати дисертаційного дослідження Чередніченко О.К. представляють теоретичний і практичний інтерес та можуть бути використані при проєктуванні інноваційних енергетичних комплексів на базі газотурбінних установок з термохімічною утилізацією теплоти, з ефективним використанням різних видів палив та зменшеним впливом відпрацьованих газів на навколишнє середовище.

Начальник сектору
енергетичних установок,
к.т.н.



А.Ю. Волошин

SMG ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
 «СМАРТ - МЕРИТАЙМ ГРУПП»
 Smart Maritime Group 73000 г. Херсон, Карантинный остров, 1, Украина, тел. 41-39-28. 41-39-37

№ 82
 от 23.07.20

На № _____ от _____

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
 результатів дисертаційної роботи
Чередніченко Олександра Костянтиновича

«Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами для високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування»

Даний Акт свідчить про те, що результати дисертаційного дослідження Чередніченко О.К. (Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова), які присвячені розробкам перспективних енергетичних установок, використано підприємством Херсонська верфь «Smart Maritime Group» при виконанні перспективних робіт з модернізації суднового енергетичного обладнання.

Запропоновані в дисертації рекомендації щодо параметрів системи термохімічної обробки палива надають можливість підготовки технічної документації для модернізації енергетичного обладнання широкого спектру використання та адаптування термохімічних технологій утилізації до існуючого енергетичного обладнання.

Результати дисертаційного дослідження Чередніченко Олександра Костянтиновича представляють теоретичний і практичний інтерес та можуть бути широко використані при модернізації суднового енергетичного обладнання для суден, що будуються, ремонтуються та модернізуються, з урахуванням вимог ІМО щодо викидів шкідливих речовин.

Головний технолог



О.М. Купянський

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор СКБ ТОВ

«Сі-Джоб Миколаїв»

Жеребецький А.В.

" 29 " 09 2020 р.

АКТ № 29/09

щодо впровадження результатів дисертаційного дослідження
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
«Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами для
високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування»
Чередніченко Олександра Костянтиновича

Даний акт складено про те, що результати дисертаційного дослідження
Чередніченко О.К. використані при формуванні технічних пропозицій та
концептуальних проробок проектів суден підприємством «Сі-Джоб Миколаїв».

За замовленням нашого підприємства Чередніченко О.К. було виконано
дослідження параметрів та характеристик перспективних схем судових
енергетичних установок 38 варіантів високотехнологічних суден сучасної
побудови (2013 – 2019 рр.): 15 проектів газовозів LNG, 8 проектів газовозів LPG,
10 проектів круїзних лайнерів; 5 проектів суден Ro-рах.

Встановлено, що застосування альтернативних енергокомплексів з
використання термохімічних технологій утилізації вторинних енергоресурсів
забезпечує суттєве підвищення енергоефективності:

- для газовозів LNG з єдиною електроенергетичною установкою на 25–40 %;
- для газовозів LNG з малообертовими дизельними двигунами на 4-6 %;
- для газовозів LPG на 30-42 % в порівнянні з енергокомплексами, які працюють на нафтових паливах, та на 22-24 % в порівнянні з енергокомплексами, які працюють на LPG;
- для круїзних суден на 15-25 % відносно енергокомплексів, які працюють на нафтових паливах, та на 10-15 % відносно енергокомплексів, які працюють на LNG;
- для суден Ro-рах на 5-15 %.

Отримані нові наукові результати дозволяють скоротити вартість та підвищити ефективність дослідно-доводочних робіт при проектуванні перспективних суднових енергетичних установок, що працюють на різних паливах, і довести їх екологічні параметри до вимог Міжнародної морської організації та Європейських вимог на промислові викиди. Застосування в складі енергетичних установок суден та об'єктів інфраструктури газотурбінних двигунів з термохімічною утилізацією скидної теплоти приводить до зменшення у 1,4-1,5 разів викидів CO₂ при експлуатації енергетичних установок.

Результати дисертаційного дослідження Чередніченко О.К. у вигляді математичних моделей, рекомендацій та методик розрахунку використовуються нашим підприємством при виконанні інших дослідно-конструкторських робіт, пов'язаних з підвищенням ефективності використання традиційних та альтернативних видів палива та зменшенням впливу енергетичного обладнання на навколишнє середовище.

Цей акт не є основою для фінансових взаєморозрахунків.

Голова Ради директорів, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,
Заслужений винахідник України,
доктор технічних наук, професор

 Жуков Ю.Д.

«29» 09 2020р.



*Box. N 15/S
8ig 31.07.2020p.*

Zaliv Ship Design, LLC
www.zalivdesign.com
info@zalivdesign.com
 Mala Morska str. 108/5, office 402
 Mykolaiv, Ukraine, 54002
 tel.: +380 512 76 54 00, fax: +380 512 76 50 03

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Чередніченко О.К.

“Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами для високотехнологічних суден і морських об’єктів нафтогазовидобування”
 при виконанні проектних проробок концептуальних суден з високоефективними та низькоемісійними інноваційними енергетичними установками

Даний Акт свідчить про те, що результати дисертаційного дослідження Чередніченко О.К. (Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова), які присвячені розробкам новітніх високоефективних та низькоемісійних суднових енергетичних установок з викидами шкідливих речовин відповідно до перспективних вимог ІМО та раціональним використанням традиційних та альтернативних палив використовувалися при виконанні проектних проробок концептуальних суден підприємством ZALIV SHIP DESIGN.

З метою визначення відповідності перспективних схем та параметрів енергетичних комплексів високотехнологічних суден вимогам ІМО з енергоефективності проведено проробку модернізації енергетичних комплексів круїзних лайнерів з використанням запропонованих Чередніченко О.К. технологій термохімічної утилізації.

За результатами проведених проробок доведено, що застосування альтернативних енергокомплексів з використання термохімічних технологій утилізації вторинних енергоресурсів забезпечує збільшення енергоефективності круїзних лайнерів на 15-25 % відносно лайнерів з енергетичними установками, які працюють на нафтових паливах, та на 10-15 % відносно варіантів з установками, які працюють на газоподібному паливі (LNG).

Zaliv Ship Design, LLC

Mala Morska str 108/5, office 402, Mykolaiv, Ukraine, 54001, tel.: +38 (0512) 765400, fax: +38 (0512) 765003
 e-mail: info@zalivdesign.com Website: www.zalivdesign.com



Zaliv Ship Design, LLC

www.zalivdesign.com

info@zalivdesign.com

Mala Morska str. 108/5, office 402

Mykolaiv, Ukraine, 54002

tel.: +380 512 76 54 00, fax: +380 512 76 50 03

Результати дисертаційного дослідження Чередніченко О.К. представляють теоретичний і практичний інтерес та можуть бути використані при проектуванні суднових енергетичних газотурбінних та комбінованих установок з викидами шкідливих речовин відповідно до перспективних вимог ІМО.

Директор ТОВ «Залів Шіп Дизайн»

Григор'юк В.К.



Zaliv Ship Design, LLC

Mala Morska str 108/5, office 402, Mykolaiv, Ukraine, 54001, tel.: +38 (0512) 765400, fax: +38 (0512) 765003

e-mail: info@zalivdesign.com Website:

www.zalivdesign.com



ДП «ПКБ ЧОРНОМОРСУДНОПРОЕКТ»
SC «Design Bureau CHERNOMORSUDOPROJEKT»

54038, Україна, м. Миколаїв, вул. Бузника, 5

5, Buznika, str., Nikolaev, 54038, Ukraine

тел.: +38 0512 34 10 60

м.тел.: +38 067 264 54 44

тел.: +38 0512 34 01 45

www.chsp.mksat.net

e-mail: chsp.pjsc@gmail.com

МРУ «Приватбанк» м. Миколаїв

роз. рахунок: 26006053207933

ЄДРПОУ: 38524933

МФО: 326610

Акт використання

результатів дисертаційної роботи О.К. Чередніченко
 «Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами для
 високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування»
 в практиці формування технічних завдань, технічних пропозицій
 та виконання проектних проробок

Даний Акт свідчить про те, що результати дисертаційного дослідження О.К. Чередніченко (Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова), які присвячені розробкам перспективних енергетичних установок використовувалися підприємством «ПКБ ЧОРНОМОРСУДНОПРОЕКТ» при виконанні проектних проробок модернізації суден.

На базі розроблених Чередніченко О.К. методів: розрахунку процесів перетворення енергії в системах обробки вуглеводневого палива, розрахунку процесів в камерах згоряння, які працюють на продуктах конверсії, розрахунку процесів перетворення енергії в металогібридних утилізаційних установках проаналізовано ефективність перспективних схем та параметрів інноваційних суднових енергетичних установок для широкого кола високотехнологічних суден.

Встановлено, що використання термохімічних технологій утилізації вторинних енергоресурсів забезпечує зменшення індексу енергетичної ефективності судна EEDI:

- для газовозів LNG з єдиною електроенергетичною установкою на 25–40 % та на 4–6 % для газовозів LNG з малообертовими дизельними двигунами;
- для газовозів LPG на 30–42 % в порівнянні з енергетичними установками, які працюють на нафтових паливах, та на 22–24 % в порівнянні з судновими енергетичними установками, які працюють на LPG.
- для круїзних суден на 15–25 % відносно енергокомплексів, які працюють на нафтових паливах, та на 10–15 % відносно енергокомплексів, які працюють на LNG;
- для суден Ro-рах на 5–15 %.

Застосування отриманих науково-прикладних результатів та розроблених математичних моделей при формуванні технічних пропозицій, виконанні передпроектних розробок і проектних робіт дозволяє забезпечити вибір і обґрунтування принципових схем енергетичних комплексів, визначити раціональні параметри та надає змогу зменшити вартість та тривалість дослідно-доводочних робіт і підвищити ефективність проектування.

Головний конструктор
 з електромеханічної спеціалізації



С.П.Коваль

**JIANGSU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
SCHOOL OF ENERGY AND POWER ENGINEERING**

Address: No. 2 Mengxi Road, Zhenjiang, Jiangsu. Post Code: 212003, CPR
Tel.: 86-511-84401190

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

OF JOINT UKRAINE – THE PEOPLE’S REPUBLIC OF CHINA
R&D PROJECT No. M/107-2019
DEVELOPMENT OF AN ADVANCED SOFC-GT SHIP POWER SYSTEM
TECHNOLOGY

**About the implementation of Oleksandr Cherednichenko (passport
FG857176) Doctor of Technical Sciences Disseretation results into the field
of ship power system technology**

The present Act-Certificate confirms that SCHOOL OF ENERGY AND POWER ENGINEERING of JIANGSU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY implemented the following joint Ukraine – The People’s Republic of China R&D project No. M/107-2019 “Development of an advanced SOFC-GT ship power system technology” results as a part of Doctor of Technical Sciences Dissertation of Cherednichenko O.C.:

- design of advanced ship power system technology with gas turbine engines for high tech ships and oil and gas floating units;
- the results of theoretical studies of the possibilities of using the htbrid SOFG-GT systems for marine power plants.

The resalts of Oleksandr Cherednichenko Dissertation work have implemented in SCHOOL OF ENERGY AND POWER ENGINEERING of JIANGSU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY and have used for desining and manufacturing of novel ship and power energy equipment.

Sincerely yours,
Dean of School of Energy
and Power Engineering

Jiangsu University of Science and Technology
No. 2 Mengxi Road, Zhenjiang, Jiangsu
Post Code: 212003, CPR, Tel.: 86-511-84401190



November 6, 2019

შპს „ჯორჯიან ვერიტასი“
ქ. ბათუმი ნონეშვილის ქუჩა №63
მობ: (+995 593) 50 25 85
ელ-ფოსტა:
tornike.chkhaide@georgianveritas.com



“Georgian Veritas” LTD
Noneshvili Street №63, Batumi, Georgia
Mobile: (+995 593) 50 25 85
E-mail:
tornike.chkhaide@georgianveritas.com

25/08/2020

TO WHOM IT MAY CONCERN

ACT-CERTIFICATE

About the implementation of Oleksandr Cherednichenko (passport FG857176) Doctor of Technical Sciences Dissertation results into the field of ship power system technology

The present Act-Certificate confirms that Batumi Navigational Teaching University implemented the following results of dissertation research, carried out in the framework of Cherednichenko O.C. Doctor of Technical Sciences Dissertation results in the practice of designing of ship power equipment according cooperation contract:

- Design of advanced ship power system technology with gas turbine engines for high tech ships and floating units.

The results of Oleksandr Cherednichenko Dissertation work have implemented in Batumi Navigational Teaching University and have used for designing and manufacturing of novel ship and power energy equipment.

Sincerely yours,
Director

Tornike Chkhaidze

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Перший проректор з науково-педагогічної роботи по організації навчального процесу та його науково-методичного забезпечення Вінницького національного технічного університету



О.М. Васілевський

« 4 » вересня 2020 р.

АКТ ПРО ВИКОРИСТАННЯ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Чередніченко Олександра Костянтиновича

«Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами для високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування» у навчальний процес Вінницького національного технічного університету

Члени комісії у складі декана факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання доцента Метя І.М, заступника декана з навчально-методичної роботи доцента Блащук Н.В. та завідувач кафедри теплоенергетики професора Ткаченка С.Й. склали цей акт про те, що представлені в дисертаційній роботі Чередніченко О.К. (Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова) результати дослідження процесів утилізації вторинних енергоресурсів теплових двигунів та методика екологічно-економічного обґрунтування ефективності термохімічної утилізації скидної теплоти впроваджені в навчальний процес факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання Вінницького національного технічного університету. Надані матеріали дисертаційного дослідження використовуються під час викладання курсів лекцій та при проведенні практичних занять з дисциплін «Експлуатація теплотехнічних установок» та «Монтаж теплоенергетичного обладнання», що викладаються здобувачам вищої освіти освітніх ступенів бакалавр та магістр за спеціальністю 144 – «Теплоенергетика».

Декан факультету будівництва,
теплоенергетики та газопостачання,
доцент, к.т.н.

І.М. Меть

Заступник декана
з навчально-методичної роботи
факультету будівництва, теплоенергетики
та газопостачання,
доцент, к.т.н.

Н.В. Блащук

Завідувач кафедри теплоенергетики
професор, д.т.н.

С.Й. Ткаченко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту електромеханіки,
енергозбереження та систем управління
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського



О.П. Чорний

« 3 »

2020 р.

АКТ ПРО ВИКОРИСТАННЯ

результатів дисертаційної роботи Чередніченка Олександра Костянтиновича
«Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами для
високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування»
у навчальний процес Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського

Даний акт свідчить про те, що представлені в дисертаційній роботі Чередніченка О.К. (Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова) результати дослідження процесів утилізації вторинних енергоресурсів теплових двигунів використовуються в навчальному процесі Інституту електромеханіки, енергозбереження та систем управління Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського при читанні курсу лекцій з дисципліни «Енергоефективні технології в промислових і комунальних об'єктах» для здобувачів вищої освіти за ОС «магістр» та проведенні практичних занять з дисципліни «Енергетичні процеси в електромеханічних системах», для здобувачів вищої освіти за ОС «бакалавр» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Завідувач кафедри систем автоматичного
управління та електроприводу,
доктор технічних наук, професор

Д.Й. Родькін

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
«Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами для
високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування»

Чередніченко Олександра Костянтиновича

у навчальний процес Навчально-наукового інституту морського флоту
Одеського Національного Морського Університету

Даний акт свідчить про те, що розроблені Чередніченко О.К. багатовимірна класифікація схем суднових енергетичних установок та методика екологічноекономічного обґрунтування ефективності термохімічної утилізації скидної теплоти впроваджені в навчальний процес Навчально-наукового інституту морського флоту ОНМУ. Надані матеріали дисертаційного дослідження використовуються при читанні курсів лекцій та при проведенні практичних занять при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт».

Директор навчально-наукового інституту
морського флоту Одеського національного
університету
канд. техн. наук,
професор ОНМУ



Шумило О.М.

11.11.2020





УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, тел.: (+38 048) 7931672, факс: (+38 048) 7931694
www.onma.edu.ua e-mail: info@onma.edu.ua Код ЄДРПОУ 01127799

№ 31/2000
17.09.2020

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Перший проректор Національного університету
«Одеська морська академія», д.ю.н., к.т.н.,
професор  О.М.Шемякін
«_____» _____ 2020 р.

АКТ

Про впровадження в навчальний процес матеріалів монографії «Термохімічні технології для енергетичних модулів плавучих об'єктів нафтогазовидобутку та суден-газовазів» авторів Чередніченко Олександра Костянтиновича та Сербіна Сергія Івановича, яка складається з вступу, 5-ти глав, списку літератури-204 найменування, висновків, загальним об'ємом 131 стор.

Даний акт складений про те, що результати монографії Чередніченко О.К. та Сербіна С.І. (Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова) впроваджені в навчальний процес на кафедрі технічної експлуатації судномеханічного факультету Національного університету «Одеська морська академія» під час викладання лекцій при проведенні практичних та лабораторних занять для здобувачів вищої освіти освітніх рівнів бакалавр, магістр та Phd за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт» в наступних дисциплінах:

рівня бакалавр:

- технологія використання робочих речовин,
- технічне використання судових технічних засобів і безпечне несення вахти,
- технічне обслуговування, діагностика і ремонт судових технічних засобів;

ISO 9001
BUREAU VERITAS
Certification



на рівні магістр :

- організація і технологія судноремонту,
- оптимізація режимів роботи суднових енергетичних установок,
- технічний менеджмент судноплавних компаній,
- управління технічною експлуатацією флоту;

на рівні Phd (аспірантури):

- методологія наукових досліджень річкових та морських систем,
- енергоресурсозбереження на річковому та морському транспорті.

Найбільш суттєвими стали результати досліджень Чередніченко О.К., які присвячені визначенню закономірностей процесів термохімічного енергоперетворення шляхом утилізації вторинних енергоресурсів суднових теплових двигунів та розробки науково-технічних основ реалізації ефективних процесів термохімічного енергоперетворення в енергетичних установках суден та плавучих об'єктів нафтогазовидобутку.

Зокрема, новизною відрізняються розроблена Чередніченко О.К. класифікація схем суднових енергетичних установок та перспективні схемні рішення газотурбінних та комбінованих дизель-газотурбінних енергетичних модулів з застосуванням термохімічної обробки палива.

Начальник учбового відділу _____

М.М.Пархоменко

Декан судномеханічного факультету,

к.т.д., професор _____

М.А.Колегаєв

Завідувач кафедри технічна експлуатація флоту,

д.т.н., професор _____

В.А.Голіков



ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Національного університету
кораблебудування імені адмірала
Макарова
Є.І. Трушляков
2020 р.

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи
Чередніченко Олександра Костянтиновича
«Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами для
високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування»
у навчальний процес Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова

Члени комісії у складі заступника директора машинобудівного навчально-наукового інституту (МННІ) доцента Гогоренко О.А., заступника директора МННІ доцента Личко Б.М. та завідувач кафедри «Експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики» професор Горбов В.М. склали цей акт про те, що представлені в дисертаційній роботі Чередніченко О.К. результати дослідження процесів утилізації вторинних енергоресурсів суднових енергетичних установок впроваджені в навчальний процес МННІ.

Надані матеріали дисертаційного дослідження використовуються під час викладання курсів лекцій та при проведенні практичних занять для здобувачів вищої освіти:

- освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт» (спеціалізація «Управління судновими технічними системами і комплексами») в дисциплінах «Технічне використання суднових технічних засобів і безпечне несення ваhti», «Технічне обслуговування, діагностика і ремонт суднових технічних засобів»;
- освітнього рівня магістр за спеціальністю 135 «Суднобудування» (спеціалізація «Суднові енергетичні установки та устаткування») в дисциплінах «Проектування суднових енергетичних установок», «Математичне моделювання суднових енергетичних установок».

Заступник директора МННІ,
канд. техн. наук, доцент



Гогоренко О.А.

Заступник директора МННІ,
канд. техн. наук, доцент



Личко Б.В.

Завідувач кафедри «Експлуатації суднових
енергетичних установок та теплоенергетики»
канд. техн. наук, професор



Горбов В.М.

УКРАЇНА
ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
"ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЯ"

Миколаївська обл, вул. Знаменська, 86. E-mail: energotechnology@gmail.com

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор
 ТОВ "Енерготехнологія"
 Ряховський А.І.
 31554411
 вересня 2020 г.

М.П.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження

Чередніченко Олександра Костянтиновича

"Ефективність енергетичних установок з термохімічними системами
 для високотехнологічних суден і морських об'єктів нафтогазовидобування"

Утилізація теплоти енергетичних та технологічних установок є однією з найактуальніших проблем, вирішення яких дає суттєвий економічний та соціально-політичний ефект. Наше підприємство приділяє особливу увагу новітнім та перспективним технологіям використання скидної теплоти та на протязі останніх 5 років підтримує науково-технічне співробітництво з Національним університетом кораблебудування в напрямку практичного використання розробок співробітників університету в цьому напрямку.

Відповідно до договору про творчу співпрацю для нашого підприємства було виконано дослідження ефективності використання термохімічної обробки вуглеводневих палив на об'єктах нафтогазовидобування. За результатами дослідження розроблена схема блоку термохімічної обробки супутнього газу з окремими термохімічними реакторами високого та низького тиску, розроблена проектна специфікація блоку термохімічної обробки для енергетичного модулю потужністю 14,1 МВт.

Визначені наступні характеристики блоку термохімічної обробки:

Тиск, МПа:	
реактор високого тиску	1,4
реактор низького тиску	0,6
Температура, К:	
реактор високого тиску	680 – 715
реактор низького тиску	660 – 675
Питома масова витрата на 1 МВт корисної потужності, кг/(МВтЧгод):	
живильного газу	165 – 170
сумарна потреба пари:	300 – 350
з рециркуляційною водою	120 – 140
з живильною водою	180 – 210
Встановлена потужність електрообладнання, кВт	25 – 30

Результати дослідження Чередніченко О.К. становлять інтерес для нашого підприємства. Результати дисертаційного дослідження цього у вигляді математичних моделей, рекомендацій та методик розрахунку використовуються нашим підприємством при виконанні дослідно-конструкторських та проектно-конструкторських робіт, пов'язаних з підвищенням ефективності використання енергії палива та зменшенням впливу енергетичного обладнання на навколишнє середовище.

Зазначені результати дослідження в напрямку використання вторинних теплових ресурсів з використанням термохімічних технологій, які виконані та передані нашому підприємству Чередніченко О.К. є безумовно актуальними та корисними для перспективних науково-технічних проектів, які виконуються нашим підприємством. Зокрема данні щодо ефективних схемних рішень та параметрів утилізаційних установок з ГТД та ДВЗ увійшли до складу проекту енерготехнологічної установки стаціонарного призначення.

Начальник відділу перспективних розробок
ТОВ "Енерготехнологія", к.т.н.



І.І. Свіридов